



Análisis de sensibilidad angular en colisiones 90º

Yannick Bericat Mercadie

Especialidad: Ingeniería Técnica Mecánica
Director de proyecto: Juan José Alba
Convocatoria: Junio 2010

Índice

Resumen.....	4
1- Introducción.....	5
1.1- General.....	5
1.2-Objetivo del proyecto.....	7
2- Reconstrucción de accidentes de tráfico.....	8
2.1- Objetivo de la reconstrucción	8
2.2- Datos de accidentalidad.....	9
2.3- Datos de trazado y geometría de la vía.....	10
2.4- Auscultación. Características del firme.....	11
2.5- Datos de tráfico	11
2.6- Datos complementarios	12
3- Simulación de accidentes.....	15
3.1- Análisis del accidente.....	15
3.2- Proceso de simulación del accidente.....	16
3.3- Resultados del análisis del accidente.....	19
4- Herramientas informáticas.....	21
5- Software utilizado	23
5.1- generalidades	23
5.2- Trabajar con el software	26
5.2.1- Modelo de colisión	27

5.3- Fiabilidad del programa	34
6- Variación de parámetros.	36
6.1- Caso base.....	36
6.2- Velocidad.....	43
6.3- Coeficiente de restitución	51
6.4- Ángulo	55
6.5 Coeficiente de fricción.....	64
6.6- Plano de contacto.....	71
6.7- Punto de impacto	76
6.7.1- Variación en el eje X	77
6.7.2 Variación en el eje Y.....	79
6.7.3- Variación en el eje Z.....	82
7- Presentación de resultados	84
8- Ejemplos, combinación de resultados	102
8.1- Mayor rotación posible, Peugeot 1.....	102
8.2- Mayor rotación posible, Peugeot 2.....	105
8.3- Mayor ángulo de salida, Peugeot 1.....	107
8.4- Mayor ángulo de salida, Peugeot 2.....	109
9- Conclusiones.	111
10- Referencias bibliográficas	112
Anexo 1.Cálculo del centro de gravedad de un vehículo.....	113
Anexo 2. Características de los vehículos implicados en el caso base.....	116
Anexo 3. Secuencias.....	118

Resumen

En este proyecto se ha estudiado mediante una herramienta informática de simulación de accidentes una colisión en particular, una colisión a 90 grados en la cual uno de los vehículos no posee velocidad mientras que el otro circula a 50 Km/h.

El programa nos permite variar parámetros relacionados con la colisión como la velocidad, el ángulo de ataque, el coeficiente de restitución, el coeficiente de fricción, el plano de contacto y el punto de impacto. Muchos de estos parámetros son difíciles de conocer en un caso real y una pequeña variación en uno de ellos puede darnos resultados totalmente distintos.

Principalmente en este estudio se realizan simulaciones partiendo del caso base y variando cada uno de los parámetros por separado para observar el resultado, observaremos la posición final, el ángulo de rotación y el ángulo de salida de cada uno de los vehículos implicados en el accidente.

Finalmente con los resultados obtenidos se realizarán simulaciones con los casos extremos, es decir mayor ángulo de rotación y mayor ángulo de salida tanto para el vehículo 1 como para el vehículo 2.

Con todo esto podremos saber cómo se comporta cada uno de los vehículos al variar los valores que el programa nos permite modificar en este tipo de colisión. Sin embargo esto no quiere decir que los resultados se puedan aplicar a todo tipo de colisiones.

1- Introducción.

1.1- General.

El uso generalizado de vehículos con motor y la movilidad que estos nos permiten ha significado un gran avance en nuestra sociedad. Sin embargo, esa masiva motorización ha traído también como consecuencia una serie de problemas, entre los que destacan los accidentes de la circulación.

En el siglo XX el número de muertos por accidentes de tráfico superó los 35 millones de personas, a lo que hay que añadir una cifra de heridos que probablemente sobrepasó los 1500 millones.

Las víctimas de accidentes de tráfico representan un drama social, humano y económico que la sociedad actual no puede asumir, por lo que es necesario poner en marcha todo tipo de medidas para intentar disminuir el número de muertos y de heridos.

Por ello, uno de los retos de nuestra sociedad está en la prevención y la reducción de los accidentes de tráfico. Para conseguirlo, es muy importante conocer las causas de los siniestros, cómo se producen y qué factores de riesgo los originan.

Los principales factores de riesgo que pueden afectar a nuestra seguridad son muy numerosos. Sin embargo, se pueden agrupar según se relacionen principalmente con los siguientes elementos: el vehículo, la vía y el factor humano.

Aunque los vehículos son cada vez más seguros y fáciles de conducir, la existencia de anomalías frecuentes y graves en algunos de los sistemas mecánicos muy directamente relacionados con la seguridad vial, pueden explicar entre el 4 y el 13% de los accidentes de tráfico,

La conducción de un vehículo tiene lugar en un espacio determinado, constituido por la vía y su entorno. En este espacio pueden distinguir al menos dos tipos de elementos importantes para la seguridad vial: unos estables (pavimentación, número de carriles, trazado, etc.) y otros cambiantes (climatología, visibilidad, incidencias del tráfico, etc.) Se considera que estos factores, en conjunto, explican entre el 10 y el 35% de los accidentes de circulación.

Por último el factor de riesgo que más influye en los accidentes de tráfico son aquellos relacionados con el factor humano, entre un 70 y un 90% de los accidentes son debidos a esta causa.

Con todo esto se demuestra que los factores que influyen en un accidente de tráfico son muy diversos y que para reducir el número de siniestros es importantísimo conocer las causas, para ello existen programas, que nos ayudan a estudiar y simular posibles accidentes y ver sus posibles consecuencias.

1.2-Objetivo del proyecto

El objeto del presente proyecto es el de realizar un ensayo no destructivo de una colisión a 90 grados mediante una herramienta informática de simulación de reconstrucción de accidentes. Este programa nos permite realizar variaciones en parámetros de choque como velocidad inicial, ángulo inicial, coeficiente de restitución, coeficiente de rozamiento, plano de contacto y punto de contacto y observar el resultado obtenido con la variación de cada parámetro. El estudio se centrará básicamente en observar el ángulo de rotación y el de salida de ambos vehículos implicados en el choque, para después saber que parámetros son los que influyen en mayor o menor medida en las reacciones de cada vehículo.

2- Reconstrucción de accidentes de tráfico.

2.1- Objetivo de la reconstrucción

El objetivo principal de la reconstrucción de un accidente de tráfico registrado en una determinada carretera es el establecimiento y análisis de la relación causa-efecto que motiva que se origine el accidente, permitiendo la elaboración de un diagnóstico de seguridad del mismo y en consecuencia el planteamiento de una serie de actuaciones encaminadas a la mejora de la seguridad.

La información de partida necesaria para la reconstrucción de un accidente se divide en los datos del parte estadístico y atestado del accidente, información del trazado geométrico de la carretera, características del firme, tráfico y velocidades existentes en el tramo y otros datos complementarios.

2.2- Datos de accidentalidad.

Procede del parte estadístico del accidente de circulación, la información registrada se estructura en los siguientes campos que se enumeran a continuación:

- Carretera y Punto kilométrico
- Luminosidad
- Fecha y Hora
- Otras Circunstancias
- Vehículos Implicados y Características
- Tipo de Circulación
- Víctimas: Muertos, Graves, Leves e Ilesos
- Señalización de Peligro
- Tipología del Accidente
- Visibilidad Restringida
- Factores Concurrentes
- Marcas Viales
- Factores Atmosféricos
- Descripción del Accidente
- Tipo de Superficie del Firme
- Croquis del Accidente

2.3- Datos de trazado y geometría de la vía.

Una posible fuente son los proyectos constructivos que proporcionan los datos relativos al trazado de la vía, el estado de alineaciones, los radios de curvatura, las pendientes longitudinales y transversales, así como lo relativo al drenaje, señalización y balizamiento, que son de especial importancia a la hora de detectar e identificar posibles inconsistencias e irregularidades que presenta la carretera y los elementos que la constituyen.

Sin embargo, en numerosas ocasiones estos proyectos son antiguos y no contemplan posibles modificaciones y rectificaciones realizadas con posterioridad

La segunda fuente para conseguir los datos reales de la carretera es la auscultación y toma de datos mediante tecnología láser avanzada. Esta metodología permite disponer de los radios de curvatura así como de las inclinaciones longitudinal (pendiente) y transversal (peralte), información vinculada al punto kilométrico de la carretera y georeferenciada mediante las coordenadas GPS.

2.4- Auscultación. Características del firme.

La auscultación realizada en la carretera tiene como finalidad analizar el estado y situación del firme en relación a la adherencia existente entre la rueda y el pavimento, permitiendo establecer una correlación entre el estado de la capa de rodadura y la accidentalidad registrada. Para ello se registran los valores relativos al coeficiente de rozamiento transversal (CRT) y la Textura (MPD) y se analiza su implicación e influencia en los accidentes.

Además es posible la filmación en video de la carretera utilizando cámaras de alta resolución con capacidad de tomar perspectiva del tramo. Esto permitirá una mayor definición y análisis de los diferentes elementos que conforman y constituyen la vía.

2.5- Datos de tráfico

Procedentes de las estaciones de aforos localizadas en la carretera proporcionan información sobre las intensidades medias diarias (IMD), porcentajes de vehículos pesados, evolución del tráfico, régimen de velocidades, distribución anual, mensual, semanal y diaria. Esta información sirve de base para la elaboración de un estudio de tráfico, analizando la funcionalidad de la vía y muy especialmente las velocidades y comportamiento de los usuarios durante la conducción.

2.6- Datos complementarios

Datos de las empresas de conservación integral (caso de existir)

Informes y listados de accidentes registrados por las empresas de conservación integral. En ocasiones disponen de unas bases de accidentes que incluyen los de daños materiales donde no se ha realizado un atestado del mismo. Se trata, por tanto, de una fuente muy importante a la hora de analizar la accidentalidad real existente en la vía.

La información suministrada en dichos informes y listados se estructura de la siguiente forma:

Localización espacio temporal: Fecha y hora del accidente, carretera, punto kilométrico, sentido de circulación.

Datos principales: Hora de aviso e intervención, parte de daños, intervención de la Policía de tráfico y levantamiento de atestado. Número de muertos, heridos graves y leves y vehículos implicados. Municipio y provincia. Tipo de Zona (carretera, urbana, travesía o variante).

Detalles de la vía: Tipo de vía, número de carriles, anchura de la calzada, carriles y mediana. Marcas viales, tipo de arcén, arcén pavimentado, tipo de firme y estado del mismo.

Factores externos: Luminosidad, factor atmosférico, visibilidad, otras circunstancias, señalización de peligro, visibilidad de la señalización vertical y horizontal, existencia de aceras. Existencia de árboles y distancia a los mismos.

Descripción del accidente: Tipo de accidente, salida de calzada y tipo de salida.

Estado de la circulación y medidas especiales. Descripción del accidente. Tipo de obstáculos y distancias al mismo. Posibles factores concurrentes.

Elementos de seguridad: Barrera de seguridad en ambos márgenes, otros elementos de seguridad

Cartografía y Ortofotos

Con el objeto de tener una mayor visión de la carretera y su entorno, la información cartográfica servirá de apoyo para la toma de decisiones.

Otra información

Toma de video e imágenes en perspectiva de la carretera objeto del estudio, mediante cámaras de alta resolución. Las imágenes de vídeo aportan una versión dinámica de algunos de los hechos analizados, sólo perceptibles en este soporte. Permite el análisis de la señalización vertical y horizontal, ubicación, visibilidad, y cuenta además con la ventaja de poder ser utilizado cuantas veces sea necesario: comparación con situaciones futuras o pasadas, análisis minucioso de determinados aspectos, etc.

Reportaje fotográfico de los puntos considerados más importantes mediante el uso de cámara digital. El reportaje fotográfico se realiza recogiendo aquellos aspectos del tramo que pudieran tener una mayor incidencia, desde el punto de vista de la seguridad vial. Conjuntamente con el soporte vídeo constituye una fuente dual de gran utilidad para una perfecta definición de los aspectos a destacar.

Recopilación de la información relativa a actuaciones de otros programas en curso, o ya ejecutadas, así como de la fecha de inicio y puesta en servicio de los tramos sometidos a alguna actuación durante el periodo de estudio. Es decir toda la documentación relativa a actuaciones ejecutadas, en ejecución, o programadas, que afectasen directamente a alguno de los tramos objeto de estudio, así como las fechas de puesta en servicio de las ya ejecutadas.

3- Simulación de accidentes.

3.1- Análisis del accidente.

Mediante las herramientas informáticas de reconstrucción de accidentes se pueden realizar diferentes análisis según las necesidades del estudio y los datos de los que se disponga. De forma resumida, se pueden clasificar en:

- Simular posibles accidentes y estudiar sus efectos
- Estudiar las visibilidades en accidentes supuestos o reales
- Reconstruir la situación de pre-impacto para el estudio de causas y responsabilidades en accidentes reales.
- Trabajar con las deformaciones post-impacto como dato o como resultado
- Simular los efectos del accidente en pasajeros, peatones, ciclistas y motoristas.

3.2- Proceso de simulación del accidente.

Para realizar la reconstrucción de un accidente es necesario definir:

- El escenario del accidente
- La geometría de la carretera y características superficiales del firme
- La posición de los vehículos antes del impacto
- Las características de los vehículos implicados
- Las trayectorias y el régimen de velocidades / aceleraciones seguida por cada vehículo durante la colisión
- La posición final de los vehículos tras el impacto.
- Otros elementos implicados en el accidente

Introducción del Escenario del Accidente y Posición de los Vehículos antes del Impacto

Mediante ficheros en formato CAD o imágenes, se permite representar a escala la localización del accidente. Esto permite introducir de forma precisa y real las posiciones de los vehículos antes y después del impacto, las trayectorias seguidas por cada vehículo, etc., simplificando el proceso de reconstrucción.

Asimismo, es necesario definir las características de la carretera, su geometría en planta y alzado, sección transversal, marcas viales, peraltes, cunetas, etc. y sus características superficiales (rozamiento, superficie seca o húmeda, etc.)

Características de los Vehículos implicados en el Accidente

El modelo de reconstrucción del accidente permite elegir, de una amplia base de datos, los vehículos que se han visto implicados en el accidente, así como modificar los parámetros del mismo en relación a dimensiones, distribución de pesos, centros de gravedad y otras cuestiones como las rigideces y amortiguaciones de los ejes, ángulos máximos de deslizamiento y características del sistema ABS.

Trayectorias

Se introducen las trayectorias seguidas por los vehículos antes de la colisión mientras que el modelo, en base a los datos introducidos, y tras la ejecución del modelo de impacto, calcula las trayectorias post-impacto.

Régimen de Velocidades/Aceleraciones de los Vehículos

En el modelo se establecen las velocidades iniciales de cada uno de los vehículos implicados y las distintas maniobras de cambio de velocidad y aceleración de cada uno de ellos. Se tienen en cuenta, por tanto, la fase previa de aceleración, posterior reacción y deceleración.

Posiciones Finales de los Vehículos tras el Accidente

Con las posiciones finales en las que quedan los vehículos tras el accidente introducidas en el modelo, el programa de reconstrucción es capaz de realizar un proceso iterativo, optimizando las velocidades y direcciones tras el impacto y

determinando, con el menor error posible, las velocidades a las que circulaban los vehículos y la trayectoria seguida en el impacto.

Otros Factores Concurrentes

El escenario del accidente puede ser reproducido tan fielmente, que incluso se pueden simular los efectos de báculos de iluminación mediante focos de luz regulables o disminuir la visibilidad a la distancia deseada con la introducción de niebla.

A la hora de elaborar un diagnóstico de las causas del accidente y proponer medidas correctoras, se deben tener en cuenta todos aquellos elementos que puedan dificultar la visibilidad o constituir un elemento de riesgo para la conducción (árboles, muros, etc.). Estos pueden ser modelizados, permitiendo analizar el escenario del accidente desde los distintos puntos de vista de los conductores implicados. De esta forma se puede concluir si un determinado elemento ha dificultado la maniobra, aumentando la peligrosidad de la carretera.

3.3- Resultados del análisis del accidente.

La simulación y reconstrucción del accidente permite analizar diferentes parámetros. Por un lado, la distribución de fuerzas actuantes en cada uno de los vehículos, así como analizar las reacciones existentes en cada una de las ruedas de los vehículos de forma que se pueda conocer el grado de adherencia y fricción entre neumático y pavimento.

La representación gráfica de estos resultados relacionando velocidades, aceleraciones, distancias, fuerzas, ángulos y energías, con el tiempo o con la distancia recorrida facilita la interpretación de los resultados.

Es posible también mediante el módulo de visualización en 3D, analizar la visibilidad de parada y de cruce, comparándolo con las distancias de parada y cruce resultantes del modelo.

Por último, en función de las trayectorias y direcciones de impacto, de las velocidades de colisión y de las masas de los vehículos es posible analizar la transformación de energía cinética en energía de deformación de los vehículos estableciendo una relación con la gravedad del accidente.

Como conclusión se puede decir que La aparición de sofisticados y complejos programas de modelización y simulación hacen de la reconstrucción de accidentes una técnica innovadora disponible para el análisis y gestión de los accidentes de circulación.

Estas técnicas de reconstrucción permiten tener una visión global del accidente identificando la influencia de cada parámetro y acotando las causas que los originan, permitiendo al analista elaborar un diagnóstico de seguridad del accidente

4- Herramientas informáticas.

Con el fin de conocer las causas y consecuencias de un accidente de tráfico existen numerosas instituciones que realizan ensayos y estudios experimentales sobre la seguridad ante los accidentes de tráfico.

Los elevados costes de preparación, ejecución e infraestructura necesarios para la realización de ensayos experimentales, añadido al desarrollo de los ordenadores que ha permitido el fácil acceso a potentes sistemas de cálculo con un coste relativamente bajo, ha posibilitado la creación de programas de simulación destinados a la reconstrucción de accidentes de tráfico, cada vez más complejos. Algunos de los modelos de reconstrucción de accidentes de tráfico mas conocidos son EDCRASH, OLDMISS, LARM, SMAC, etc. En general aborda el problema con una representación plana y aplicando las ecuaciones de conservación de la energía, conservación del momento lineal, conservación del momento angular y la segunda ley de Newton.

Otros modelos, KRASH, MARC, NONSAP, DYCAST, ACTION, WHAM II, UMCVS, NASTRAN Y ANSYS, se basan en métodos de elementos finitos y análisis estructural. Pero, los parámetros necesarios para calcular estos modelos, los equipos informáticos precisos para ello y el elevado número de horas que hay que invertir en el proceso, hacen que estas herramientas sean totalmente inadecuadas para su uso con propósitos de reconstrucción de accidentes.

La base de partida de los estudios de seguridad vial consiste en determinar las causas por las que se producen los accidentes. La confluencia de numerosos factores que los originan dificulta en la gran mayoría de los casos un conocimiento preciso de lo ocurrido.

Las técnicas de reconstrucción de accidentes mediante la utilización de modelos informáticos supone una herramienta de apoyo al analista para acercarse al origen del problema de forma que conozca la influencia de cada parámetro en el conjunto.

5- Software utilizado

5.1- generalidades

Es un programa para la simulación hacia atrás y hacia delante del movimiento de los vehículos y cálculo de los parámetros de accidentes. Sirve también como herramienta cómoda para el análisis distancia-tiempo.

- Atendiendo al *factor vehículo* permite seleccionar de una extensa base de datos los vehículos implicados, cargando de forma automática las características asociadas (dimensiones, pesos, rigidez, etc.), así como incorporar otros (número de ocupantes, posición y pesos, carga y situación) e incluso introducir la existencia de sistemas especiales como el ABS o el Airbag.
- Atendiendo al *factor carretera* es posible definir el trazado en planta y alzado, la sección transversal, el estado del pavimento (CRT, presencia de hielo o grasa,...), así como la existencia de otros elementos en el entorno que dificulten incluso la visibilidad como la existencia de edificaciones, muros, arbolado, niebla, etc.
- En relación al *factor humano*, es posible analizar las maniobras y velocidades llevadas por el usuario antes y después del impacto. Así, es posible definir los tiempos de aceleración, deceleración y reacción utilizados por el usuario en el momento de producirse el accidente.
- Existe también la posibilidad de introducir datos relativos a las posiciones finales de los vehículos, longitudes de huellas de frenadas, etc.

En general el programa permite la reconstrucción del desarrollo del accidente desde el momento crítico, pasando por la situación anterior y posterior al choque, hasta la posición final de los coches. El programa está en continuo perfeccionamiento y está basado en un interfaz Windows, y gracias a la integración total de los diferentes módulos, la base de datos de vehículos, los modelos de simulación para el cálculo del movimiento de los coches, los modelos de choque y animación y la animación tridimensional, el programa es un cómodo medio de ayuda para la reconstrucción de accidentes de tráfico.

El programa trabaja con dos modelos:

a) Modelo *cinemático*, en el cual la simulación se realiza mediante la fórmula de una desaceleración media.

b) Modelo *cinético*, en el cual la simulación se realiza teniendo en cuenta:

El cálculo de las fuerzas en la rueda (fuerza lateral y fuerza de frenada).

El empleo de la ecuación de movimiento de Newton para el cálculo de la desaceleración del centro de gravedad y la ecuación del cálculo del cambio de rotación.

Integración numérica de las 6 ecuaciones del movimiento.

Determinación de las nuevas coordenadas del centro de gravedad.

Determinación de las fuerzas verticales modificadas por todas las ruedas considerando los parámetros de suspensión.

Una ventaja esencial es el cómodo interfaz, que permite una fácil comunicación con el programa y posibilita casi inmediatamente la interpretación de los resultados de los cálculos, ya que éste transforma continuamente los cálculos numéricos en gráficos lo que permite el seguimiento directo del movimiento del vehículo en la pantalla. Los resultados de la simulación se pueden representar en forma de protocolos, diagramas, dibujos e imágenes tridimensionales. Además permite realizar una animación tridimensional de la reconstrucción del accidente, siendo especialmente relevante ya que permite observar éste desde cualquier punto de vista.

5.2- Trabajar con el software

Trabaja con la siguiente estructura, el usuario define los valores de los parámetros iniciales. Con el uso de uno de los modelos de trayectoria se calculan las condiciones de pre impacto después se pasa al modelo de colisión, con los resultados de esta fase se calcula de nuevo mediante el modelo de trayectoria las posiciones finales.



Valoración crítica

Con respecto a los programas informáticos, generalmente se han de considerar las siguientes premisas:

- 1.- Un programa de ordenador nunca puede ser la solución absoluta, ya que el resultado a conseguir dependerá de la calidad y cantidad de los datos disponibles (inputs).
- 2.- La mayoría de los programas pretenden ser una herramienta más de apoyo en la investigación de accidentes.
- 3.- El resultado más relevante de la generalidad de los programas, no el único, viene expresado en el cálculo de la velocidad inicial del móvil.

- 4.- Las particulares limitaciones de los programas, con respecto a la casuística de los accidentes, en algunas ocasiones los convierten en complementarios unos de otros.
- 5.- Que a mayores prestaciones del programa (ampliación de la casuística para la que es útil), se corresponde una mayor complejidad del mismo y particular preparación de su operador.
- 6.- Que no es aconsejable la utilización de programas informáticos de reconstrucción de accidentes sin:
 - Tener buenos conocimientos de los fundamentos físicos.
 - Conocer las simplificaciones y restricciones del programa informático y su “hoja de cálculo”.
 - Poseer experiencia en la investigación de accidentes.

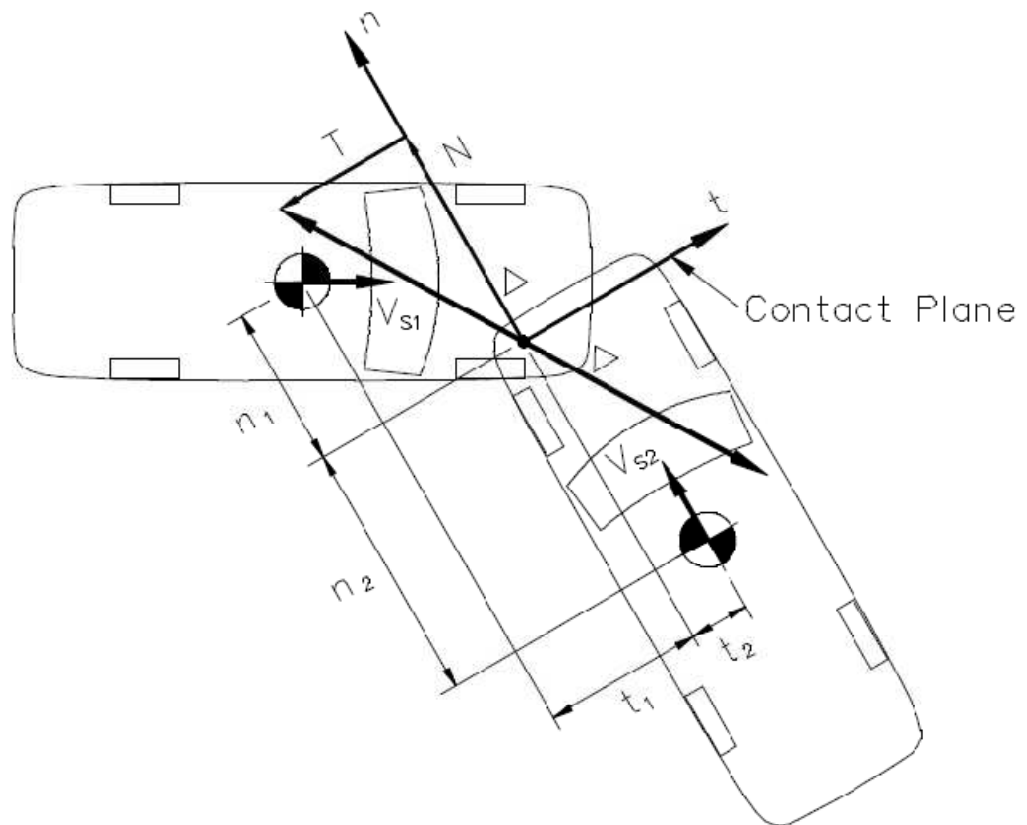
5.2.1- Modelo de colisión

PC Crash utiliza un modelo de colisión que describió por primera vez Kudlich y Slibar en 1964. El modelo de impacto puede ser de 2 o 3 dimensiones, se basa en la restitución en vez de los coeficientes de rigidez. En este modelo tan solo se considera la integral de la curva fuerza-tiempo (el momento transferido). El modelo supone un cambio de las fuerzas de impacto en un tiempo infinitamente pequeño y en un solo punto: el punto de impulso.

El modelo contiene dos tipos de colisiones: pleno impacto e impacto deslizante. El pleno impacto se refiere a un tipo en el que la velocidad común se alcanza en el

área de contacto de los dos vehículos y el impacto deslizante se refiere a cuando ambos cuerpos no llegan a una velocidad común (los vehículos deslizan entre si).

El modelo de colisión es definido en un eje de coordenadas local cuyo origen está en el punto de impulso.



Las coordenadas se dividen en componente tangencial y normal que definen el plano de contacto entre los vehículos.

La componente tangencial y normal de la velocidad del vehículo 1 en el punto de impulso es:

$$(1) \quad \mathbf{V}_{T1} = \mathbf{V}_{Tcg1} + \omega_{z1} \cdot \mathbf{n}_1$$

$$(2) \quad \mathbf{V}_{N1} = \mathbf{V}_{Ncg1} + \omega_{z1} \cdot \mathbf{t}_1$$

Los números del subíndice corresponden al vehículo en cuestión en este caso el vehículo 1. Ahora planteamos las mismas ecuaciones para el vehículo 2. A continuación las componentes de la velocidad relativa entre los dos vehículos en el punto de impulso, puede ser formulada.

$$(3) \quad V_T = V_{T1} - V_{T2}$$

$$(4) \quad V_N = V_{N1} - V_{N2}$$

El balance del momento para ambos vehículos viene dado por:

$$(5) \quad m_1 \cdot (V'_{Tcg1} - V_{Tcg1}) = T$$

$$(6) \quad m_1 \cdot (V'_{Ncg1} - V_{Ncg1}) = N$$

$$(7) \quad m_2 \cdot (V'_{Tcg2} - V_{Tcg2}) = -T$$

$$(8) \quad m_2 \cdot (V'_{Ncg2} - V_{Ncg2}) = -N$$

El balance del momento angular es:

$$(9) \quad I_{z1} \cdot (\omega'_{z1} - \omega_{z1}) = T \cdot n_1 - N \cdot t_1$$

$$(10) \quad I_{z2} \cdot (\omega'_{z2} - \omega_{z2}) = T \cdot n_2 - N \cdot t_2$$

Al combinar estas ecuaciones, el cambio de la velocidad relativa de los vehículos en el punto de impulso puede ser calculada a partir de las siguientes ecuaciones:

$$(11) \quad V'_T - V_T = \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{n_1^2}{I_{z1}} + \frac{n_2^2}{I_{z2}} \right) \cdot T - \left(\frac{t_1 \cdot n_1}{I_{z1}} + \frac{t_2 \cdot n_2}{I_{z2}} \right) \cdot N$$

$$(12) \quad V'_N - V_N = \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{t_1^2}{I_{z1}} + \frac{t_2^2}{I_{z2}} \right) \cdot N - \left(\frac{t_1 \cdot n_1}{I_{z1}} + \frac{t_2 \cdot n_2}{I_{z2}} \right) \cdot T$$

Desde aquí, el procedimiento de solución depende de la situación: pleno impacto o impacto de deslizamiento. Para resolver las ecuaciones mencionadas anteriormente y calcular las velocidades de impacto y rotación es necesario realizar otras hipótesis. Vamos a estudiar en primer caso el impacto total.

Impacto total

Como se menciona anteriormente, el modelo que utiliza el programa se basa en la restitución en lugar de la rigidez del vehículo. Debido a la elasticidad de las estructuras de los vehículos, los vehículos se separan después de la colisión. El coeficiente de restitución es definido como relación entre la restitución del impulso y el impulso de la compresión. En forma siguiente fórmula:

$$(13) \quad \varepsilon = \frac{P_R}{P_C}$$

Este coeficiente de restitución es definido por el usuario y tiene un valor entre 0 y 1. Cuando el coeficiente de restitución es uno la colisión es totalmente elástica. En la práctica esto nunca ocurre. Si el coeficiente es 0 la colisión es totalmente plástica, esto tampoco ocurre en los accidentes reales. En la práctica el valor está comprendido entre 0.1 y 0.3. En general, puede decirse que cuanto más se dañan los vehículos más bajo es el coeficiente de restitución. Para casos en los que los vehículos prácticamente no se han dañado se utilizan valores de 0.8 pero en estos casos no es necesario el análisis de la colisión.

El momento total se puede calcular como:

$$(14) \quad P = P_C + P_R = P_C \cdot (1 + \epsilon)$$

El impacto total se define como aquel en el que no hay movimiento relativo entre los vehículos en el punto de impulso al final de la fase de compresión. Utiliza la dirección normal y tangencial para el intercambio de momento.

$$(15) \quad T_C = \frac{V_N \cdot \left(\frac{t_1 \cdot n_1}{I_{z1}} + \frac{t_2 \cdot n_2}{I_{z2}} \right) + V_T \cdot \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{t_1^2}{I_{z1}} + \frac{t_2^2}{I_{z2}} \right)}{\left(\frac{t_1 \cdot n_1}{I_{z1}} + \frac{t_2 \cdot n_2}{I_{z2}} \right)^2 - \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{n_1^2}{I_{z1}} + \frac{n_2^2}{I_{z2}} \right) \cdot \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{t_1^2}{I_{z1}} + \frac{t_2^2}{I_{z2}} \right)}$$

$$(16) \quad N_C = \frac{V_T \cdot \left(\frac{t_1 \cdot n_1}{I_{z1}} + \frac{t_2 \cdot n_2}{I_{z2}} \right) + V_N \cdot \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{n_1^2}{I_{z1}} + \frac{n_2^2}{I_{z2}} \right)}{\left(\frac{t_1 \cdot n_1}{I_{z1}} + \frac{t_2 \cdot n_2}{I_{z2}} \right)^2 - \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{n_1^2}{I_{z1}} + \frac{n_2^2}{I_{z2}} \right) \cdot \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{t_1^2}{I_{z1}} + \frac{t_2^2}{I_{z2}} \right)}$$

De la ecuación anterior (14) las componentes del intercambio de momento pueden ser calculadas:

$$(17) \quad T = T_C \cdot (1 + \epsilon)$$

$$(18) \quad N = N_C \cdot (1 + \epsilon)$$

Impacto deslizando

A diferencia del impacto total en el impacto de deslizamiento los dos vehículos nunca alcanzarán una velocidad común en el punto impulso durante el impacto. Para este caso, PC Crash supone que no se produce ningún movimiento entre los vehículos en el punto de impulso al final de la fase de compresión en la dirección normal al plano de contacto. Las ecuaciones (16) y (18) por lo tanto pueden ser utilizadas para calcular el momento intercambiado total en la dirección normal.

Además, el PC Crash asume en impactos de deslizamiento un coeficiente de fricción entre vehículos μ_v de manera que

$$(19) \quad T = \mu_v \cdot N$$

En el caso de un impacto de deslizamiento, el usuario tiene que definir un plano de contacto, que se desliza a lo largo de dos vehículos. El punto impulso tiene que estar en este plano.

A partir de esto, se puede concluir que, introducir el coeficiente de restitución es una parte muy difícil en el modelo de colisión. Al utilizar el coeficiente de restitución hace que ya no sea necesario conocer la rigidez exacta de los cuerpos de los coches. La determinación de la rigidez de la parte del vehículo que fue aplastado en el accidente es muy difícil y un trabajo casi imposible de hacer para todos los modelos de coches. Utilizando un modelo simplificado como este simple basado en la restitución hace posible calcular la fase de colisión, sin la necesidad de una base de datos muy grande, con coeficientes de rigidez de diferentes lugares en el cuerpo de todos los vehículos. Todos valores diferentes de la rigidez de la carrocería del vehículo se sustituirán por un valor único para el coeficiente de la restitución de una colisión. Se puede decir que esta simplificación no provoca errores de orden superior en comparación con un procedimiento de cálculo basado en rigidez.

5.3- Fiabilidad del programa

Las fórmulas utilizadas en el proceso de reconstrucción de accidentes de tráfico asume varias suposiciones. Esto implica que habrá una diferencia entre el accidente de la vida real y la reconstrucción calculada. En general este error está permitido, por el hecho de que existen métodos que simplifican los cálculos para la reconstrucción de accidentes de tráfico. El caso de la vida real tiene que ser transformado en teorías que describen la mecánica y la cinética con respecto a las colisiones. Pero es importante que la persona que reconstruye el accidente sea consciente de los supuestos que hizo utilizando las herramientas de cálculo y tenerlos en cuenta a la hora de mostrar los resultados.

Si tomamos como ejemplo, las fases típicas durante una colisión entre dos vehículos y comparamos los datos de un crash test con los de una simulación se puede observar que Durante la fase de penetración la suposición de un punto de impacto en el que todas las fuerzas y energías son transferidas no es del todo correcta. Durante el caso real la duración física del impacto es muy pequeña mientras que en la simulación el tiempo es 0 entonces se producen pequeños errores aceptables. El modelo de simulación se constituye de muchos modelos diferentes que mas o menos describen la realidad. El modelo de trayectoria, que contiene un modelo de neumáticos y un modelo de suspensión, por ejemplo, interactúa con el modelo de colisión y así sucesivamente. En cada uno de estos supuestos, los modelos están hechos aproximándose a la realidad. Ahora, puede entenderse que los resultados dependen de la entrada de datos y de los modelos utilizados. Con otros supuestos o una leve modificación de datos de entrada diferentes el resultado puede variar considerablemente.

Es muy difícil cuantificar los errores cometidos mediante el uso de un determinado modelo. La dificultad entre otras cosas depende de la situación que se investiga. Una suposición o estimación ligeramente diferente de un parámetro de entrada no puede influir en el resultado en un caso, pero puede tener una influencia muy grande en otra simulación de accidente de tráfico.

La persona que utilice estas herramientas para la reconstrucción de accidentes tiene que ser consciente de la fiabilidad de los modelos en el caso particular investigado

6- Variación de parámetros.

6.1- Caso base.

El supuesto a partir del cual se tomará como referencia para comenzar a trabajar es una colisión a 90 grados, en la cual intervienen dos vehículos iguales, en este caso dos Peugeot 307 cuyas características están enumeradas en el Anexo 2. Han sido cargados desde la base de datos KBA 2006 que es la base de datos del departamento alemán de fabricantes de vehículos.

Como regla general la simulación se inicia en la posición de impacto, porque en accidentes reales esta es la mejor referencia que existe. Así que los coches se colocan en la posición de choque y se realiza una estimación previa de las velocidades que en nuestro caso será de 50Km/h para el vehículo 1 y 0 Km/h para el vehículo 2.

El siguiente paso es definir la secuencia de ambos vehículos, en la secuencia se puede definir la frenada, aceleración, reacción del conductor, giro etc. Anexo 3

La secuencia del vehículo que colisiona se divide en cuatro fases, reacción, rozamiento, inicio y deceleración. El inicio de la simulación comienza para un tiempo igual a 0, el rozamiento entre las ruedas y la superficie se puede variar, aumentándolo conseguimos que la deceleración sea mayor. En este supuesto definimos que el coeficiente de rozamiento para ambos vehículos sea 0,8, que es el

que se utiliza cuando la calzada está seca y con buen firme. Si esta estuviese mojada, sucia o con nieve utilizaríamos un coeficiente menor.

El tiempo de reacción del conductor suele variar entre 0.7 y 1 segundo, dependiendo del estado físico, edad, cansancio... en este caso elegimos 0.8 seg.

El siguiente paso a la hora de definir la secuencia, es la colisión, que define el cambio brusco de velocidad, en nuestro caso dejamos que el programa sea el que la calcule.

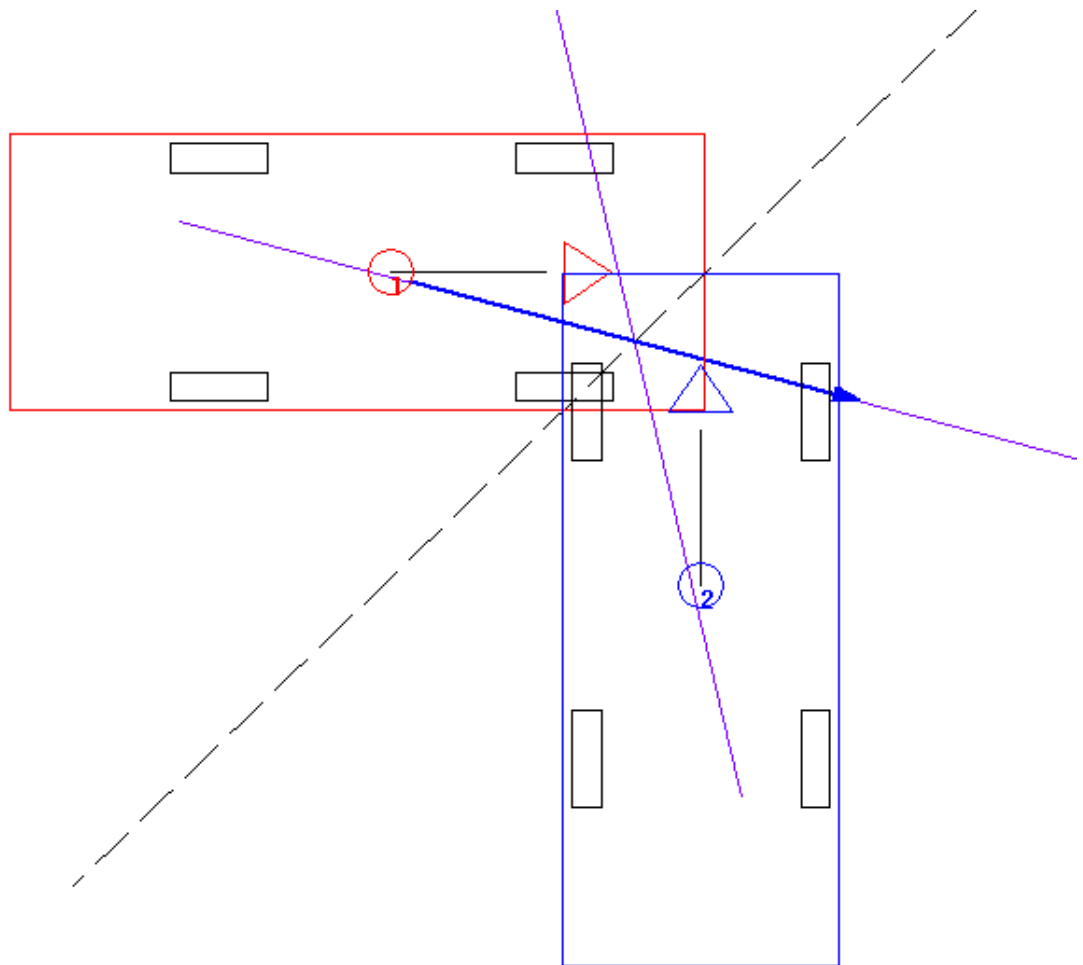
Por último definimos la deceleración producida por la actuación del conductor sobre el freno. Que para el vehículo 1, es máxima 7.74 m/s^2 . Y para el vehículo 2 es de 2.16 m/s^2 , debido a que el conductor no actúa sobre el freno pero se bloquea la rueda delantera izquierda debido al choque.

En todos los casos se presupone el centro de gravedad 0.5 sino todos los cambios en aspectos de suspensión y masas, no se ven reflejados en los resultados obtenidos, este valor es aproximado ya que en la base de datos no aparece este dato, para calcularlo exactamente sería necesario realizar los cálculos que aparecen en el Anexo 1.

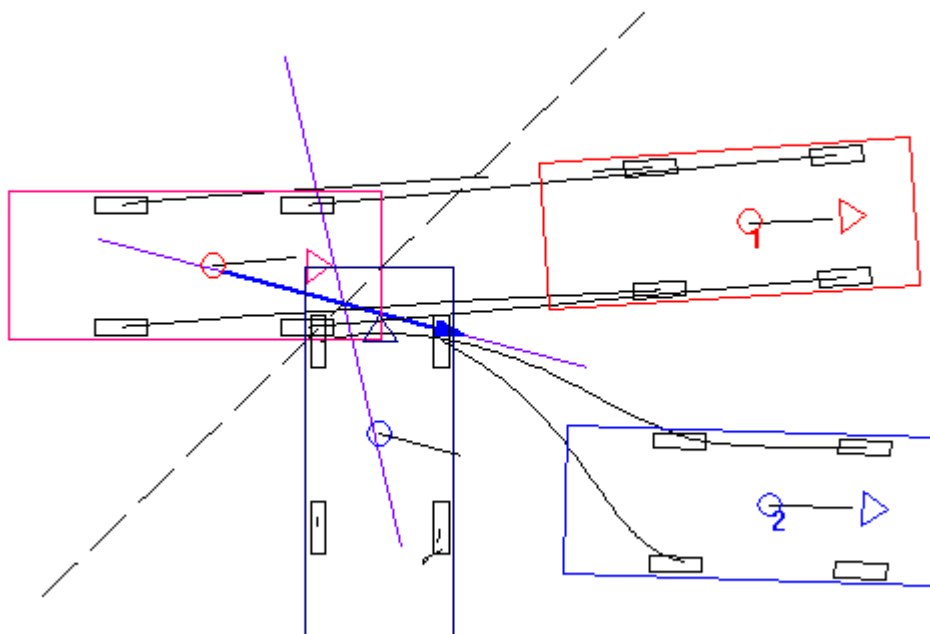
Otro de los puntos importantes a definir es el plano de contacto ($\phi=44.19$) y el punto de impacto ($x=2.17$, $y=-0.44$, $z=0.45$) que es el punto donde los dos vehículos implicados en la colisión llegan a la misma velocidad, en este punto el impulso se transfiere. Se produce en al final de la fase de compresión antes de que comiencen a separarse. En la mayoría de los casos se definen según los daños producidos en ambos vehículos pero también hay que contar con la parte elástica del choque.

Una vez definidas las secuencias y la posición de impacto, lo que debemos definir es el modelo de simulación que se va a realizar, el programa nos deja elegir entre un modelo basado en cinemática en el cual no tiene en cuenta las fuerzas de dinámica del vehículo o un modelo basado en cinética que si las tiene en cuenta, este último será el que utilizaremos.

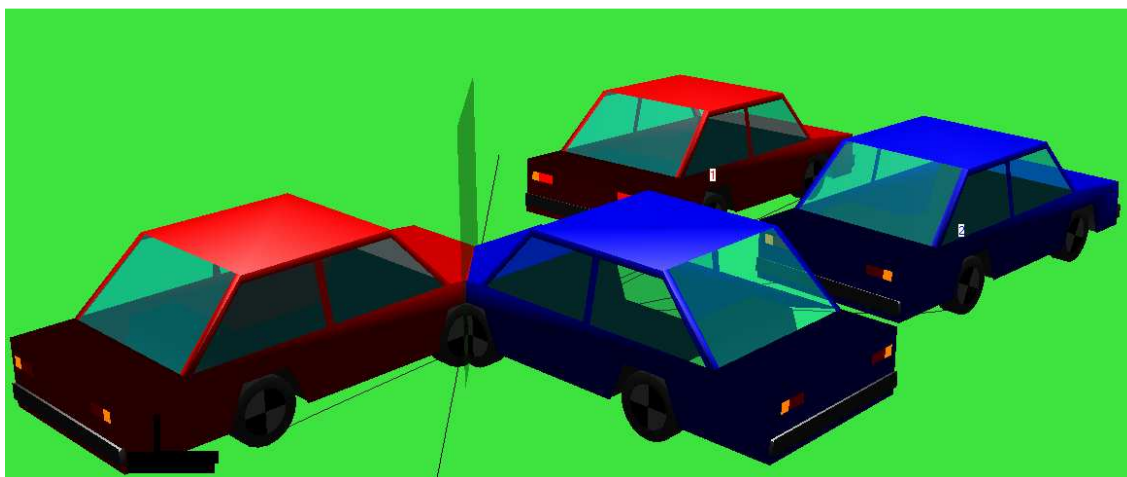
En la siguiente figura podemos observar la posición de impacto a partir de la cual comienza la simulación en ella se puede observar como el programa nos muestra en pantalla el plano de contacto (línea discontinua) el cono de fricción (línea morada) y el vector de fuerza (flecha azul) que más adelante veremos que son y como varían.



En la siguiente figura observamos el resultado



Vemos como el programa nos muestra en pantalla las posiciones finales y las huellas de frenada. También podemos obtener una visualización en 3 dimensiones



A partir de aquí podemos comenzar a estudiar el caso con los valores que nos muestra el software. El programa nos muestra múltiples valores y gráficas referidos a la colisión pero nos centraremos en los referidos a la dinámica

1 PEUGEOT- :										
t[s]	x [m]	y [m]	z [m]	phi1 [deg]	phi2 [deg]	phi3 [deg]	Phi4 [deg]	Vx [km/h]	Vy [km/h]	Vz [km/h]
0	0.63	0	0.5	0	0	0	0	50	0	0
1	6.7	0.5	0.5	-0.12	2.88	3.62	4.709	7.92	0.54	0
2	7.01	0.52	0.5	0	3.01	3.87	4.660	0.45	0.02	0
2.055	7.01	0.52	0.5	0	3.01	3.87	4.660	0.45	0.02	0

*phi 1: Balanceo; phi2: Cabeceo. phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

2 PEUGEOT- :										
t[s]	x [m]	y [m]	z [m]	phi1 [deg]	phi2 [deg]	phi3 [deg]	Phi4 [deg]	Vx [km/h]	Vy [km/h]	Vz [km/h]
0	2.6	-2	0.5	0	0	90	0	0	0	0
1	5.89	-2.79	0.5	1.19	0.64	-4.47	-13.502	8.76	-0.52	0
2	7.24	-2.85	0.5	0.03	0.81	-1.94	-10.381	0.95	-0.02	0
2.055	7.25	-2.85	0.5	0.02	0.82	-1.91	-10.359	0.64	-0.01	0

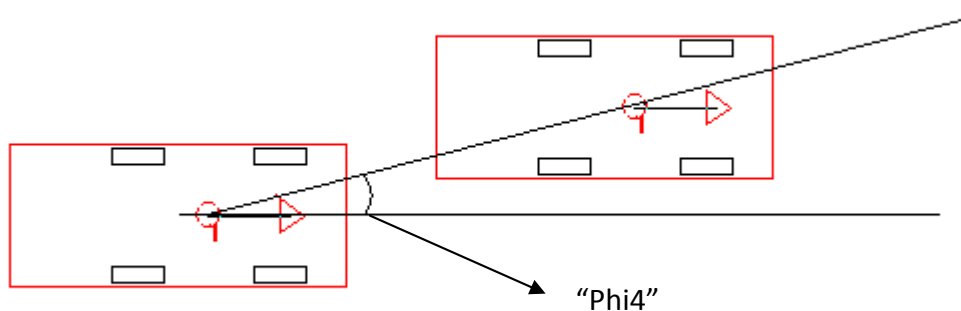
*phi 1: Balanceo; phi2: Cabeceo. phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

Se observa del informe obtenido como el programa nos muestra no solo los valores finales sino que también valores intermedios cada segundo. La simulación finaliza cuando la energía se pierde por completo es decir cuando ambos vehículos se detienen.

En este proyecto básicamente estudiaremos las posiciones finales, ángulo de rotación “Phi3” y ángulo de salida del vehículo “Phi4”.



“Phi3”



A partir de aquí podemos comenzar a realizar el estudio variando valores como la velocidad de impacto, ángulo, coeficiente de restitución, coeficiente de fricción, plano de contacto, punto de contacto y ver cómo se comportan ambos coches.

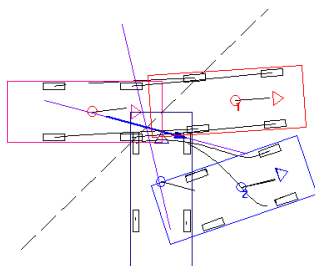
6.2- Velocidad

En este primer estudio vamos a variar las velocidades de ambos vehículos, comenzaremos siempre desde el caso base en el que la colisión es a 90º y manteniendo constantes el punto de impacto, plano de contacto, coeficiente de restitución y coeficiente de rozamiento del plano de contacto, variaremos la velocidad del vehículo 1 en un rango de 40Km/h hasta 60Km/h y la del vehículo 2 desde 0 Km/h hasta 20 Km/h. Observaremos las variaciones que se producen.

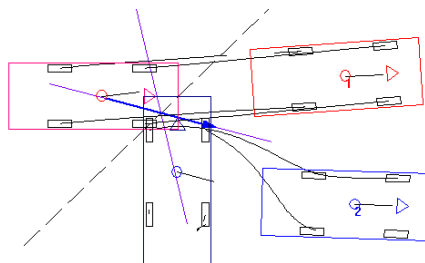
Solo estudiaremos las posiciones finales de cada vehículo por separado, las intermedias están reflejadas en el archivo Anexo. Hay que tener en cuenta que el eje de coordenadas es un eje de coordenadas global y no local para cada vehículo.

A partir de aquí utilizaremos P1 para referirnos al vehículo 1 y P2 para referirnos al vehículo 2.

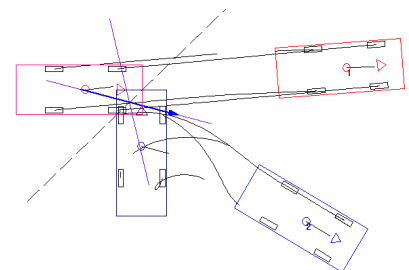
Caso 1 es aquel en el que se mantiene constante la velocidad del vehículo 2 igual a 0 y variamos la de P 1 desde 40 (caso 1.1) hasta 60 Km/h (Caso 1.3).



Caso 1.1



Caso 1.2



Caso 1.3

PEUGEOT 1

	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 1.1 $v_o=40\text{Km/h}$	1.38	4.73	0.31	3.62	4.324
Caso 1.2 $v_o=50\text{Km/h}$	2.055	7.01	0.52	3.87	4.660
Caso 1.3 $v_o=60\text{Km/h}$	2.34	9.82	0.77	4.36	4.789

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

PEUGEOT 2

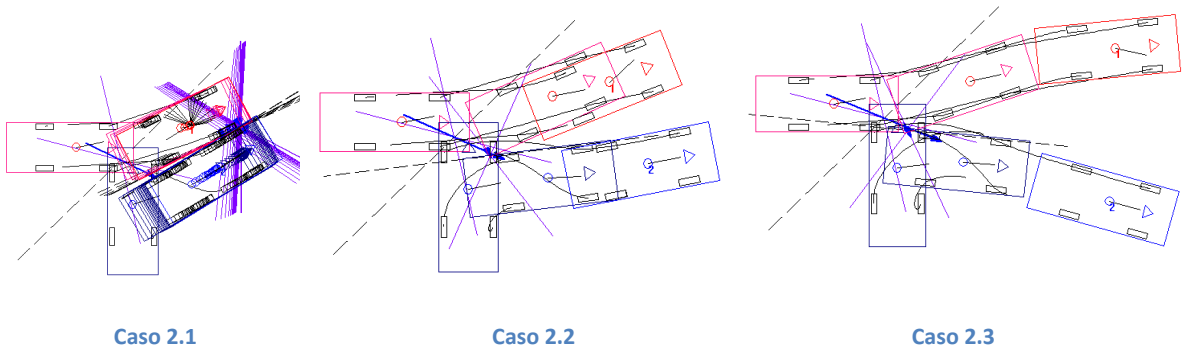
	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 1.1 $v_o=0\text{Km/h}$	1.38	4.89	-2.15	18.73	-3.748
Caso 1.2 $v_o=0\text{Km/h}$	2.055	7.25	-2.85	-1.91	-10.359
Caso 1.3 $v_o=0\text{Km/h}$	2.34	8.39	-4.64	-30.86	-24.511

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

Se puede observar como las variaciones en el ángulo de salida y el de rotación del vehículo que impacta son mínimas mientras que en el vehículo que recibe el choque se producen grandes variaciones. Tanto el ángulo de salida como el ángulo de rotación disminuye (aumenta con signo negativo) conforme aumenta la velocidad de P1. Por supuesto la posición final de P1 aumenta conforme aumenta la velocidad, ambos vehículos quedan más separados el uno del otro.

Otro aspecto que tenemos que tener en cuenta es la deformación producida, en este supuesto la deformación para P1=46cm y para P2=48cm.

Caso 2 la velocidad de P2 es ahora 10 Km/h mientras que el rango de P1 es igual que en el caso anterior



PEUGEOT 1

	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 2.1 $v_o=40\text{Km/h}$	1.68	4.58	0.77	27.52	11.03
Caso 2.2 $v_o=50\text{Km/h}$	2.205	6.8	1.19	21.54	10.92
Caso 2.3 $v_o=60\text{Km/h}$	2.43	9.38	1.72	5.43	11.12

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

PEUGEOT 2

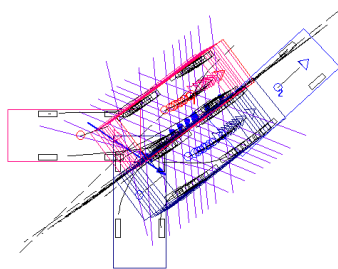
	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 2.1 $v_o=10\text{Km/h}$	1.68	5.67	-0.68	31.72	23.27
Caso 2.2 $v_o=10\text{Km/h}$	2.205	7.93	-1.24	10.97	8.12
Caso 2.3 $v_o=10\text{Km/h}$	2.43	9.21	-3.04	-15.7	-8.94

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

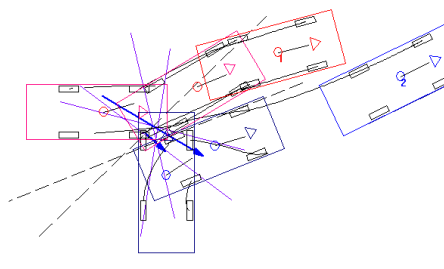
En este caso a diferencia del anterior se observa como ϕ_3 del vehículo que impacta P1 si que varia, aunque disminuye conforme aumenta su velocidad, en el caso 2.1 se producen varias colisiones debido a que es arrastrado por P2. Cuando la diferencia de velocidades es mayor, como en el caso 2.2 y 2.3 entonces se produce un solo choque. Si nos fijamos en el ángulo ϕ_4 del vehículo 1 vemos como prácticamente no varía.

Los ángulos ϕ_3 y ϕ_4 del vehículo 2 disminuyen en este caso igual que en el anterior, aunque en el 2.1 y 2.2 vemos como el ángulo de salida es positivo debido a que ejerce una fuerza en el eje Y

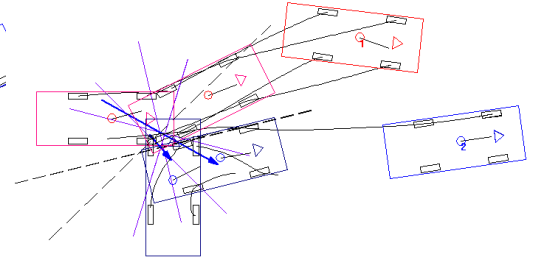
Caso 3 en este último caso la velocidad de P2 es de 20 Km/h



Caso 3.1



Caso 3.2



Caso 3.3

PEUGEOT 1

	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 3.1 $v_o=40\text{Km/h}$	2.28	4.33	1.35	36.32	20.05
Caso 3.2 $v_o=50\text{Km/h}$	2.7	6.12	1.88	15.05	18.90
Caso 3.3 $v_o=60\text{Km/h}$	2.91	8.63	2.62	-6.87	18.13

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

PEUGEOT 2

	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 3.1 $v_o=20\text{Km/h}$	2.28	7.22	1.6	42.67	37.93
Caso 3.2 $v_o=20\text{Km/h}$	2.7	9.98	1.12	25.87	22.92
Caso 3.3 $v_o=20\text{Km/h}$	2.91	11.89	-0.73	7.99	7.78

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

En este caso al haber un aumento de velocidad de P2 las deformaciones de ambos vehículos aumentan, siendo la de P1 51 cm y la de P2 54 cm. En los tres casos se producen varios choques como se puede observar en la figura.

También observamos como ahora los ángulos de P2 son todos positivos ya que ejerce una fuerza en el eje Y mayor que en los demás casos aunque disminuyen en igual medida que en los casos anteriores conforme aumenta la velocidad de P1. Φ_4 del vehículo uno no sufre prácticamente variación mientras que Φ_3 si, una diferencia máxima de 29.45 grados .

Conclusión

A la vista de los resultados obtenidos podemos afirmar que para el vehículo que impacta "P1" el ángulo de salida prácticamente no varía en cada caso en particular, es decir en el rango de 40 Km/h a 60Km/h aunque sí que lo hace al aumentar la velocidad de P2.

Si nos fijamos ahora en el ángulo de rotación de P1 observamos que cuando P2 tiene velocidad 0Km/h no se produce prácticamente variación pero en los casos 2 y 3 donde las velocidades son 10 y 20 Km/h para P2 vemos como si que varia disminuyendo conforme aumenta su propia velocidad

El ángulo Φ_3 del vehículo 2 disminuye siempre conforme aumenta la velocidad de P1 esto quiere decir que a mayor velocidad de P1 mayor impulso le trasmite y por lo tanto mayor momento de rotación, sin embargo conforme aumenta su velocidad el ángulo es menor debido a que aplica una fuerza en sentido contrario al momento.

El ángulo de salida de P2 comienza cuando su velocidad es 0 siendo negativo ya que no ejerce ninguna fuerza en el eje Y pasando a ser positivo a partir del caso dos donde comienza a tener velocidad

6.3- Coeficiente de restitución

En el choque predominantemente inelástico (plástico) la energía del impacto se absorbe en la deformación de las estructuras, se transforma en calor, así como también se puede disipar en forma de ruido, vibraciones o a través de los neumáticos. En el choque predominantemente elástico una parte importante de la energía se conserva, sin que el vehículo se deforme, o siendo la deformación mínima.

Se llama coeficiente de restitución ϵ al cociente de velocidades relativas después y antes de la colisión. Tal coeficiente es un indicativo de la energía absorbida con ocasión del impacto; es igualmente un indicativo para valorar la elasticidad. Tomando dicha variable entre 0 y 1, en los impactos plásticos, con mucha deformación, el coeficiente de restitución sería 0, mientras que en choques idealmente elásticos dicho coeficiente adquiere el valor de 1. A mayor elasticidad, mayor coeficiente de restitución

El coeficiente de restitución, pues está muy ligado a la deformación del vehículo, tanto que a mayor deformación el valor de ϵ disminuye. En colisiones de poca velocidad ϵ tiende a acercarse a un valor máximo.

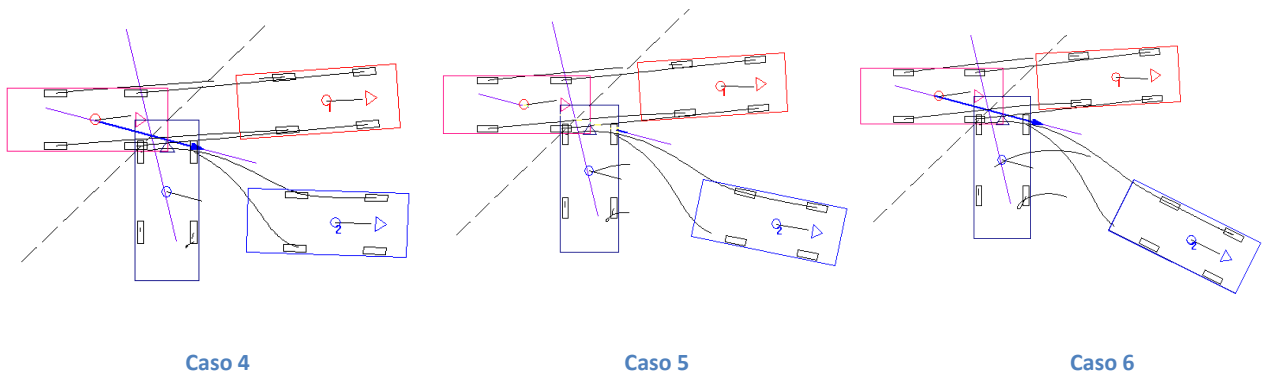
Las nuevas orientaciones para la construcción de automóviles, van encaminadas a una mayor seguridad ante un eventual impacto, en especial a partir de ciertas velocidades, con el fin de prevenir daños físicos severos a las personas, discurren bajo criterios de deformidad controlada, llegando incluso a que sea posible la destrucción periférica de la carrocería, tratando así de que la energía cinética

desencadenada a raíz del choque se vea absorbida al máximo. En otros tiempos, algunas casas de automóviles fabricaban estructuras muy rígidas en su conjunto, queriendo con ello imprimir la máxima resistencia a la caja del vehículo. Hoy en día han cambiado los criterios, pues se pretende que la periferia del vehículo amortigüe al máximo el golpe, en particular en velocidades altas o moderadas, preservando al máximo el interior del habitáculo, e incorporando el concepto de habitáculo de supervivencia.

Casos

Como en el caso anterior la simulación va a contar con tres situaciones que partiendo del caso base y manteniendo constante valores como la velocidad ($P1=50\text{km/h}$, $P2=0\text{km/h}$), plano de contacto ($44,19$ grados), punto de impacto ($x=2,17, y=-0,44, z=0,45$) y deformación ($P1=46\text{cm}$, $P2=48\text{cm}$) se variara en este caso el coeficiente de restitución desde un valor inicial igual a 0.1 que es el que el programa nos da por defecto, hasta 0.3 un valor más elástico en el que se supone que la carrocería del vehículo absorbe menos energía y por lo tanto esa energía se utilizara en impulso y rotación de los vehículos.

Tan solo estudiarán los resultados de la simulación en las posiciones finales, en el archivo Anexo se encuentran los valores de las posiciones intermedias.



PEUGEOT 1

	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 4 $\varepsilon=0.1$	2.055	7.01	0.52	3.87	4.66
Caso 5 $\varepsilon=0.2$	2.295	6.57	0.55	3.55	5.29
Caso 6 $\varepsilon=0.3$	2.355	6.14	0.59	3.11	6.11

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

PEUGEOT 2

	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 4 $\varepsilon=0.1$	2.055	7.25	-2.85	-1.91	-10.36
Caso 5 $\varepsilon=0.2$	2.295	8.24	-3.6	-11.41	-15.84
Caso 6 $\varepsilon=0.3$	2.355	8.49	-4.5	-26.56	-23.00

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

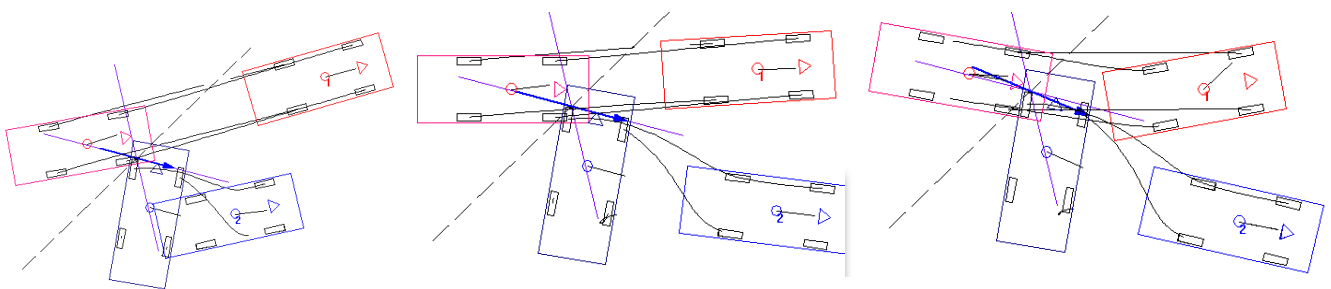
A la vista de los resultados se ve como la variación de ϕ_3 y ϕ_4 del vehículo que impacta son mínimas mientras que en el vehículo que recibe el choque disminuyen conforme aumenta el coeficiente de restitución, esto es debido a que al aumentar el coeficiente y ser un choque mas elástico la energía absorbida en el choque es menor y por lo tanto toda esa energía se transforma en momento para que P2 rote.

6.4- Ángulo

En este estudio se parte de nuevo desde el caso base en el que dos Peugeot 307 colisionan mientras uno lleva una velocidad de 50 Km/h y el otro 0 Km/h pero en este caso se varia el ángulo del vehículo que impacta en un rango desde 10 a -10 grados mientras que el vehículo dos varía desde 80 a 100 grados. Manteniendo constantes todos los demás valores a excepción de la deformación que cambia según el ángulo de ataque.

Al igual que en los casos anteriores solo se estudian las posiciones finales, las intermedias se encuentran reflejadas en el archivo Anexo.

Caso7 en este caso se mantiene constante el ángulo de P2 a 80 grados mientras el de P1 varía desde 10 grados hasta -10.



Caso 7.1

Caso 7.2

Caso 7.3

PEUGEOT 1

	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 7.1 Phi3 _o =10	1.515	8.09	2.11	15.82	15.79
Caso 7.2 Phi3 _o =0	2.115	6.99	0.52	3.59	4.67
Caso 7.3 Phi3 _o =-10	2.145	6.59	-0.4	10.27	-3.84

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

PEUGEOT 2

	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 7.1 Phi3 _o =80	1.515	5.27	-2.2	12.59	-4.28
Caso 7.2 Phi3 _o =80	2.115	7.48	-3.16	-7.03	-13.37
Caso 7.3 Phi3 _o =80	2.145	7.49	-3.77	-12.87	-19.90

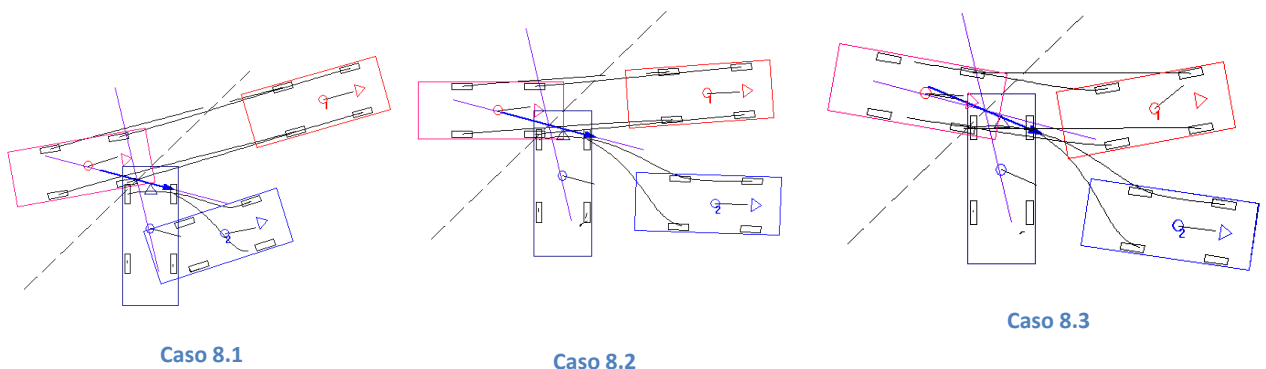
phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

Debemos tener en cuenta las deformaciones que son: para el caso 7.1 $P1=42\text{cm}$ $P2=19\text{cm}$; para el caso 7.2 $P1=46\text{cm}$, $P2=19\text{cm}$; y para el 7.3 $P1=40\text{cm}$, $P2=20\text{cm}$

Si se estudia cada coche por separado se observa como para $P1$ el ángulo de salida disminuye conforme disminuye su ángulo de colisión sin embargo el ángulo de rotación también disminuye excepto en el caso 7.3.

Observando el vehículo dos, ambos ángulos ϕ_3 y ϕ_4 disminuyen conforme disminuye el ángulo de impacto del vehículo 1 ya que el choque es cada vez más directo. Llegando a tener una variación máxima para ϕ_3 de 25,46 grados y de 15.62 para ϕ_4

Caso 8 en este caso se mantiene constante a 90 grados el vehículo 2 mientras que el 1 varia igual que en el caso anterior



PEUGEOT 1

	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 8.1 Phi3 _o =10	1.41	8.09	2.11	15.82	15.79
Caso 8.2 Phi3 _o =0	2.055	7.01	0.52	3.87	4.66
Caso 8.3 Phi3 _o =-10	2.07	6.6	-0.4	10.35	-3.83

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

PEUGEOT 2

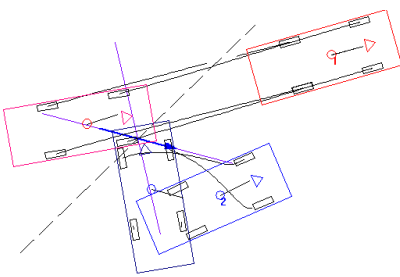
	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 8.1 Phi3 _o =90	1.41	4.97	-2.16	17.93	-3.86
Caso 8.2 Phi3 _o =90	2.055	7.25	-2.85	-1.91	-10.36
Caso 8.3 Phi3 _o =90	2.07	7.21	-3.46	-8.31	-17.57

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

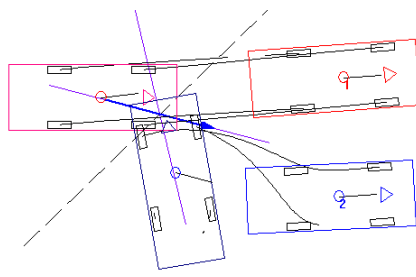
Las deformaciones son: Caso 8.1 $P1=42\text{cm}$, $P2=48\text{cm}$; Caso 8.2 $P1=42\text{ cm}$, $P2=48\text{cm}$;
Caso 8.3 $P1=40\text{cm}$, $P2=50\text{cm}$.

Se observa para P1 como el ángulo de salida es menor conforme disminuye su ángulo de ataque y el ángulo de rotación es prácticamente igual al del caso anterior.
Para P2 disminuye también igual que en el caso anterior

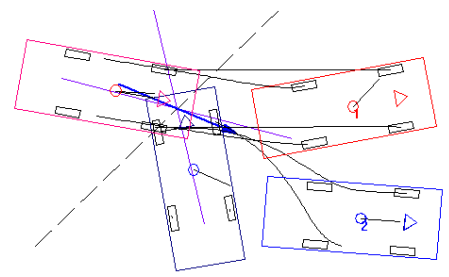
Caso 9



Caso 9.1



Caso 9.2



Caso 9.3

PEUGEOT 1

	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 9.1 Phi3 _o =10	1.38	8.08	2.11	15.82	15.81
Caso 9.2 Phi3 _o =0	1.965	7.03	0.52	4.2	4.65
Caso 9.3 Phi3 _o =-10	1.95	6.62	-0.4	10.42	-3.82

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

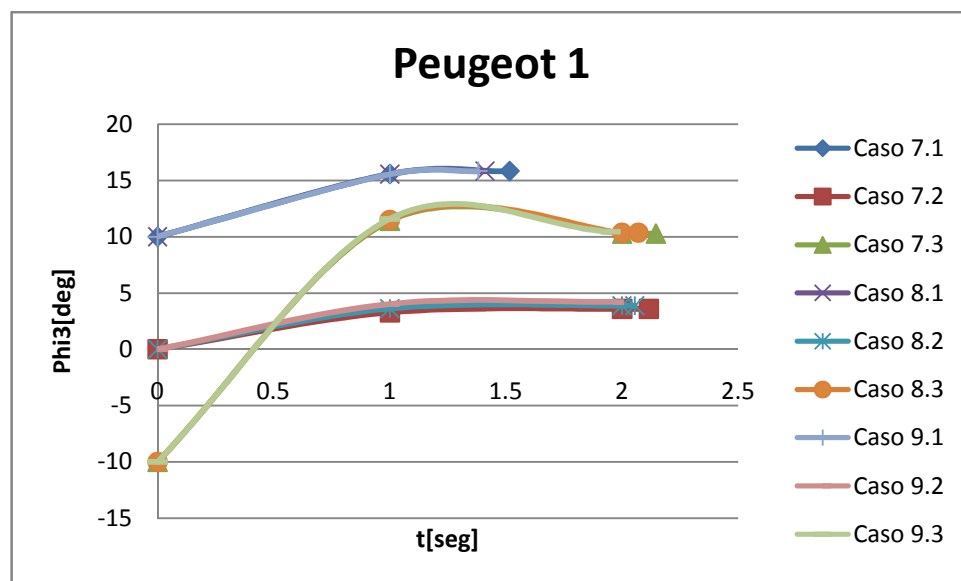
PEUGEOT 2

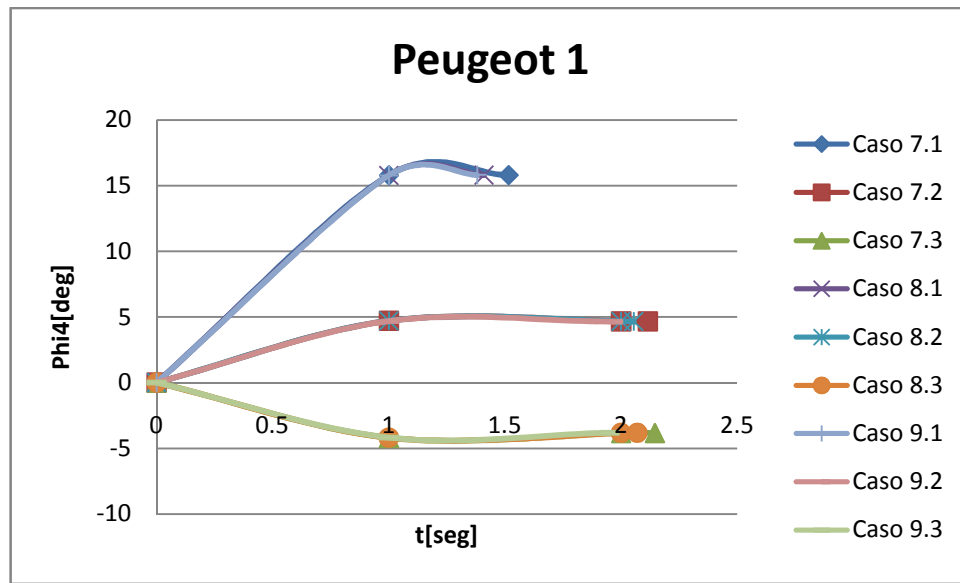
	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 9.1 Phi3 _o =100	1.38	4.7	-2.18	23.66	-4.90
Caso 9.2 Phi3 _o =100	1.965	6.91	-2.62	2.76	-8.19
Caso 9.3 Phi3 _o =100	1.95	6.82	-3.23	-4.3	-16.25

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

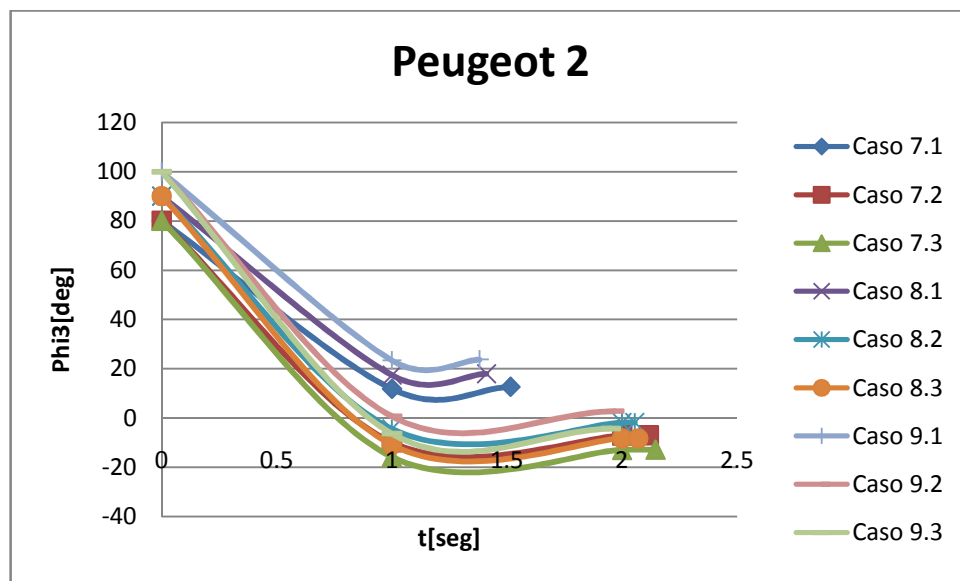
También en este caso, al igual que en los anteriores Φ_3 del vehículo uno es igual y los ángulos de P2 disminuyen.

Como conclusión se observa en las siguientes graficas como el ángulo del Peugeot 2 no afecta prácticamente a los ángulos de rotación y de salida del vehículo 1



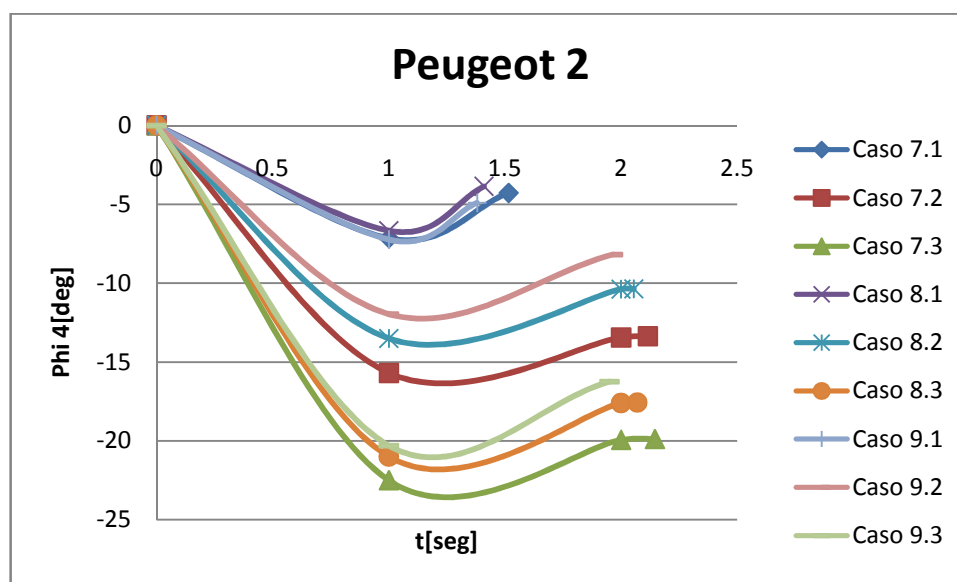


A diferencia del Peugeot 1, el Peugeot 2 si que varía el ángulo de rotación conforme varía el ángulo de ataque.



Si observamos la gráfica el ángulo aumenta conforme aumenta el ángulo inicial de P1 y a su vez este es disminuye conforme aumenta su ángulo inicial. Siendo positivos mientras este es 80 grados y negativos cuando su valor es de 90 y 100 grados respectivamente.

Observando en este caso el ángulo de salida de P2 se puede decir que se forman tres grupos cuando el ángulo ataque es 10, 0 y -10 y a su vez en cada grupo cuanto menor es el ángulo de P2 menor es el ángulo de salida.



6.5 Coeficiente de fricción

El modelo de Kudlich-Slibar se caracteriza por la definición del punto de impacto. El punto de impacto es el punto donde se supone que la fuerza del choque debe intercambiarse. La elasticidad de la colisión es considerada, con base en un coeficiente de restitución. Este modelo también considera el deslizamiento de un vehículo a lo largo de otro vehículo basado en el ángulo del plano de contacto y coeficiente de fricción.

El coeficiente de fricción de contacto describe la relación entre las componentes normal y tangencial del vector de impulso.

$$\mathbf{T} = \mu_v \cdot \mathbf{N}$$

Para realizar el siguiente estudio se variará el coeficiente de fricción desde un valor $\mu=0$ (caso 10) donde no existe cono de fricción y el vector de fuerza es totalmente perpendicular al plano de contacto hasta un valor $\mu=0.7$ (Caso 17) donde el cono de fricción está mucho más abierto y el vector está dentro del cono de fricción.

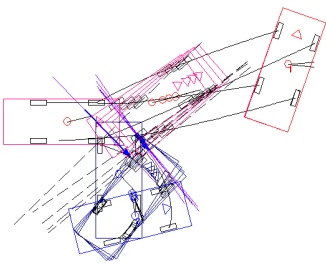
Recordamos que el cono de fricción es las dos líneas que definen los ángulos límites de la fuerza de impacto en el cual el deslizamiento no se llevará a cabo. Esto quiere decir que mientras el vector de fuerza esté dentro del cono se produce un impacto total por lo tanto no hay deslizamiento entre las superficies de los vehículos implicados en el choque. El coeficiente de rozamiento está directamente relacionado con el ángulo del cono $\mu = \tan(\alpha/2)$ esto quiere decir que cuando el cono forma 90° el coeficiente de rozamiento es 1.

Al estudiar los siguientes casos se observa como desde el caso 10 ($\mu=0$) hasta el caso 15 ($\mu=0.5$) el vector de fuerza se encuentra en el extremo del cono de fricción, por lo tanto son impactos deslizantes esto hace que tenga una componente tangencial en sentido contrario al choque en la que interviene el coeficiente de rozamiento. Para el caso 16 ($\mu=0.6$) el vector de fuerza ya está dentro del cono de fricción por lo tanto no hay deslizamiento a partir de aquí si se aumenta el coeficiente el cono de fricción está cada vez más abierto y por lo tanto el vector siempre se encuentra en su interior.

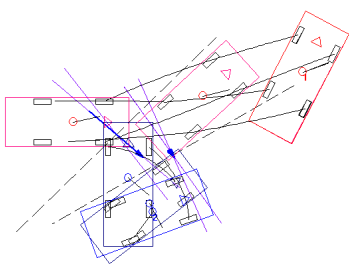
Otro de los aspectos que debemos tener en cuenta es la deformación producida en los vehículos, se mantienen constante todos los valores relativos a la colisión es decir velocidad ($P1=50$ Km/h, $P2 = 0$ Km/h), coeficiente de restitución ($\varepsilon = 0.1$), punto de impacto ($X = 2.17$, $Y = -0.44$, $Z = 0.45$) y ángulo del plano de contacto ($\phi = 44.19$) sin embargo la deformación disminuye conforme aumenta el coeficiente de rozamiento.

Deformación

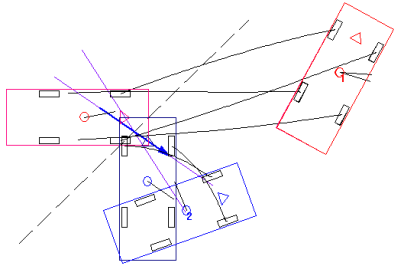
	Peugeot 1	Peugeot 2
Caso 10	61 cm	61 cm
Caso 11	58 cm	60 cm
Caso 12	53 cm	56 cm
Caso 13	50 cm	53 cm
Caso 14	48 cm	50 cm
Caso 15	47 cm	49 cm
Caso 16	46 cm	48 cm
Caso 17	46 cm	48 cm



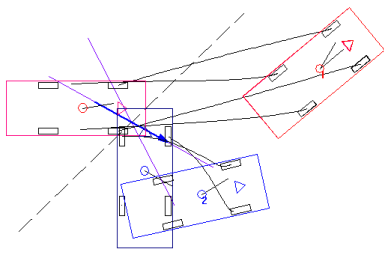
Caso 10



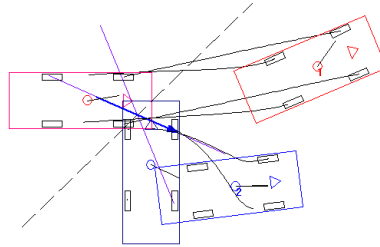
Caso 11



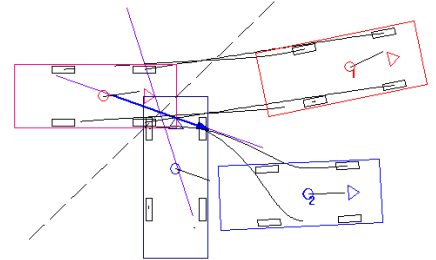
Caso 12



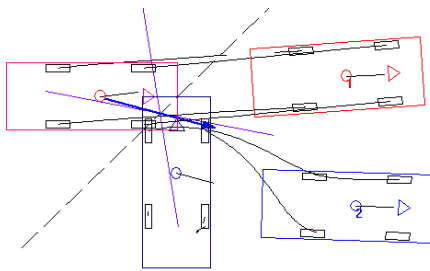
Caso 13



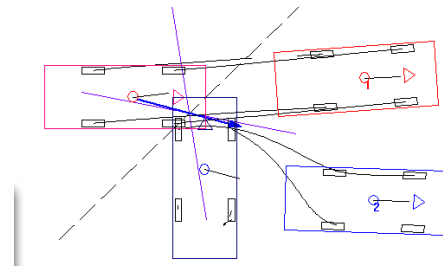
Caso 14



Caso 15



Caso 16



Caso 17

En las siguientes tablas se muestran los datos de las posiciones finales en el archivo Anexo se encuentran para cada caso las posiciones intermedias

1 PEUGEOT- :

	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 10 $\mu=0$	1.47	9.07	2.19	70.7	14.55
Caso 11 $\mu=0.1$	1.44	8.85	1.78	62.2	12.22
Caso 12 $\mu=0.2$	1.425	8.59	1.39	61.23	9.91
Caso 13 $\mu=0.3$	1.395	8.17	1.25	39.81	9.41
Caso 14 $\mu=0.4$	1.5	7.78	1.05	23.03	8.35
Caso 15 $\mu=0.5$	1.8	7.38	0.8	11.5	6.76
Caso 16 $\mu=0.6$	2.055	7.01	0.52	3.87	4.66
Caso 17 $\mu=0.7$	2.055	7.01	0.52	3.87	4.66

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

Según los resultados obtenidos para el vehículo 1 se observa como el ángulo de rotación ϕ_3 disminuye conforme aumenta el coeficiente, esto es debido a que el ángulo del vector de fuerza es cada vez menor, comienza siendo perpendicular al plano de contacto y acaba para el caso 16 con una inclinación casi horizontal esto hace que la reacción opuesta que recibe P1 sea cada vez menor en el eje Y.

Para ϕ_4 también es cada vez menor aunque las diferencias son mínimas desde un valor de 14.55 grados para el caso 10 hasta 4.66 grados para el caso en el que $\mu=0.7$

2 PEUGEOT- :

	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 10 $\mu=0$	1.47	3.23	-3.6	13.91	-68.51
Caso 11 $\mu=0.1$	1.44	3.48	-3.22	20.01	-54.20
Caso 12 $\mu=0.2$	1.425	3.81	-2.9	19.5	-36.64
Caso 13 $\mu=0.3$	1.395	4.42	-2.75	12.48	-22.40
Caso 14 $\mu=0.4$	1.5	5.23	-2.67	6.98	-14.29
Caso 15 $\mu=0.5$	1.8	6.24	-2.69	2.57	-10.73
Caso 16 $\mu=0.6$	2.055	7.25	-2.85	-1.91	-10.36
Caso 17 $\mu=0.7$	2.055	7.25	-2.85	-1.91	-10.36

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

Exceptuando el caso 10 se observa al igual que P1 como en ángulo de rotación y el ángulo de salida disminuyen conforme aumenta el coeficiente en este caso disminuye en mayor medida el ϕ_4 al revés que ocurre para P1. La diferencia entre el caso 10 y el caso 17 para ϕ_3 es de 15.82 grados mientras que para ϕ_4 es de 58.15 grados.

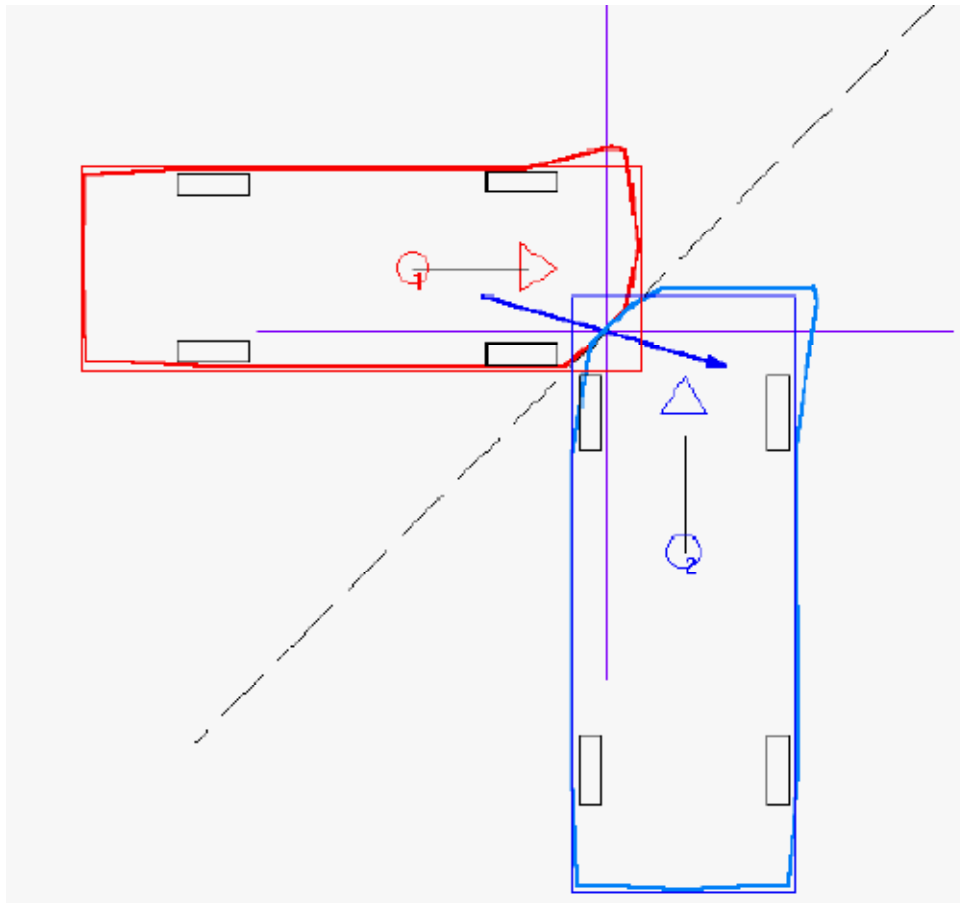
Como se puede observar a partir de $\mu=0.6$ en adelante los valores no varían ya que el vector de impulso se encuentra en el interior del cono de fricción.

6.6- Plano de contacto

En el caso de impactos deslizantes los dos vehículos nunca alcanzarán una velocidad común en el punto impulso durante el impacto, se debe definir un plano de contacto, a lo largo del cual se deslizan los dos vehículos. El punto impulso tiene que estar en este plano.

Para tal situación deben realizarse las siguientes hipótesis:

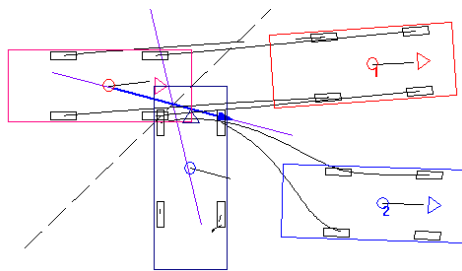
- No hay movimiento relativo entre ambos vehículos, el punto de impulso se encuentra al final de la fase de compresión en la dirección normal al plano de contacto.
- La dirección del movimiento se ve limitada por la fricción μ . Este valor define el la fricción entre los dos vehículos impactantes.
- La relación entre la compresión y el impulso de restitución es definida por el “coeficiente de restitución”



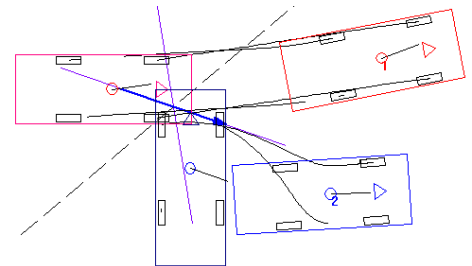
Casos

En este nuevo estudio se mantendrá constante al igual que en el caso base la velocidad ($P1 = 50 \text{ Km/h}$, $P2 = 0 \text{ Km/h}$) el coeficiente de restitución ($\epsilon = 0.1$), punto de impacto ($X = 2.17$, $Y = -0.44$, $Z = 0.45$) y lo que varía será el ángulo del plano de contacto.

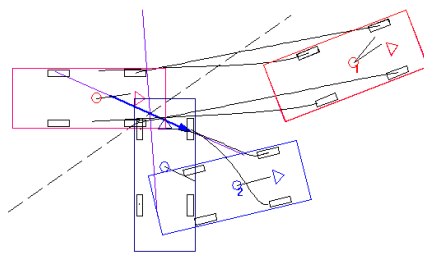
El valor que el programa da por defecto para esta colisión en concreto es el de 44.19, si aumentamos este valor los resultados no varía porque el vector de fuerza se mueve en el interior del plano de contacto ya que al mover el plano el cono también se mueve manteniendo los ángulos constantes. Así que se toman valores menores de 44.19 para realizar el estudio así el vector siempre se encuentra en el extremo del cono de fricción siendo pues una colisión en el que ambos vehículos deslizan el uno con el otro (impacto deslizante)



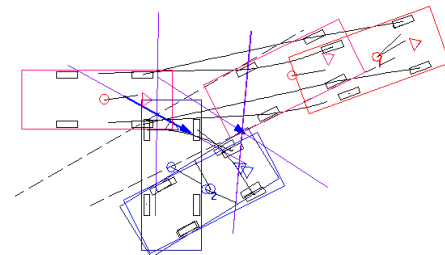
Caso 18



Caso 19



Caso 20



Caso 21

Los valores que se muestran en las siguientes tablas son los relativos a las posiciones finales, los valores intermedios se encuentran en el archivo Anexo.

1 PEUGEOT- :

	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 18 Phi=44.19	2.055	7.01	0.52	3.87	4.66
Caso 19 Phi= 40	1.77	7.42	0.78	10.93	6.55
Caso 20 Phi= 35	1.38	8.06	1.02	21.14	7.82
Caso 21 Phi= 30	1.425	8.65	1.25	19.98	8.86

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

A la vista de los resultados se observa como para P1 el ángulo de salida y el ángulo de rotación aumentan conforme disminuye el ángulo del plano de contacto una diferencia de hasta 16 grados para phi 3 y de 4 para phi 4.

2 PEUGEOT- :

	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 18 Phi=44.19	2.055	7.25	-2.85	-1.91	-10.36
Caso 19 Phi= 40	1.77	6.14	-2.64	3.54	-10.25
Caso 20 Phi= 35	1.38	4.7	-2.54	13.48	-14.42
Caso 21 Phi= 30	1.425	3.75	-2.65	26.96	-29.48

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

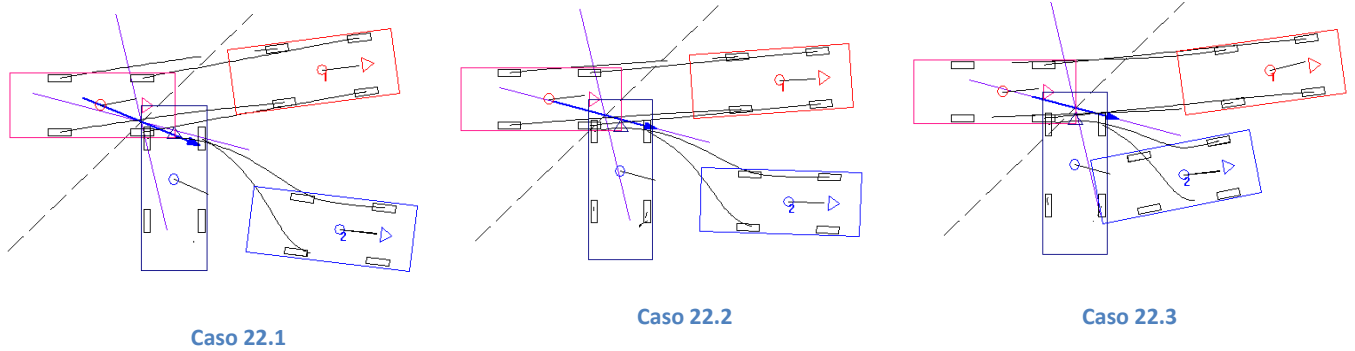
Para el Peugeot 2 la diferencia entre el caso 18 y el 21 es mayor que para el Peugeot 1, es de 24 grados para Phi3 y de 19 para Phi 4. En este supuesto phi 3 aumenta mientras que phi4 disminuye conforme el ángulo del plano de contacto es menor.

6.7- Punto de impacto

Se define el origen de coordenadas en el punto de impacto. Como se dijo anteriormente este punto (imaginario) es aquel en el que ambos vehículos alcanzan una velocidad común. El programa calcula todas las fuerzas en este punto, se encuentra por aproximación al final de la fase de compresión justo antes de que los vehículos comiencen a separarse. En este momento los daños físicos son debidos a una deformación plástica pero también a una elástica. En los casos reales tan solo podemos medir las deformaciones plásticas por lo tanto la parte elástica debe ser estimada. La localización del punto de impacto también tiene que ser aproximada. En la mayoría de los casos debe localizarse por el método ensayo error.

En este nuevo ensayo se realizarán variaciones en el punto de contacto, se dividirán en tres casos generales el primero (22) se variará el punto de contacto en el eje X en el segundo (23) el eje Y y en el tercero (24) el eje Z. Mientras se mantiene constante la velocidad ($P1 = 50 \text{ Km/h}$, $P2 = 0 \text{ Km/h}$) el coeficiente de restitución ($\epsilon = 0.1$) y el plano de contacto ($\phi = 44.19$).

6.7.1- Variación en el eje X



Los valores de las siguientes tablas corresponden a valores finales, los valores intermedios se encuentran en el archivo Anexo.

1 PEUGEOT- :

	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 22.1 X = 1.72	2.025	6.58	0.95	7.42	9.07
Caso 22.2 X = 2.17	2.055	7.01	0.52	3.87	4.66
Caso 22.3 X = 2.61	1.605	7.94	0.58	7.73	4.54

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

Se observa como las diferencias en el ángulo de rotación para P1 tanto si el punto está en un extremo como en el otro la diferencia es mínima, sin embargo para el ángulo de salida este es menor conforme el punto de impacto está más desplazado hacia P2.

2 PEUGEOT- :

	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 22.1 X = 1.72	2.025	7.05	-3.35	-6.9	-16.88
Caso 22.2 X = 2.17	2.055	7.25	-2.85	-1.91	-10.36
Caso 22.3 X = 2.61	1.605	5.58	-2.28	11.01	-5.37

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

Para P2 el ángulo de rotación aumenta hasta 4 grados con la variación del punto de contacto aumentando conforme este se desplaza a lo largo del eje X. El ángulo de salida aumenta 11.51 grados.

Al variar el punto de impacto en el eje X debemos tener muy en cuenta las deformaciones producidas. En este caso

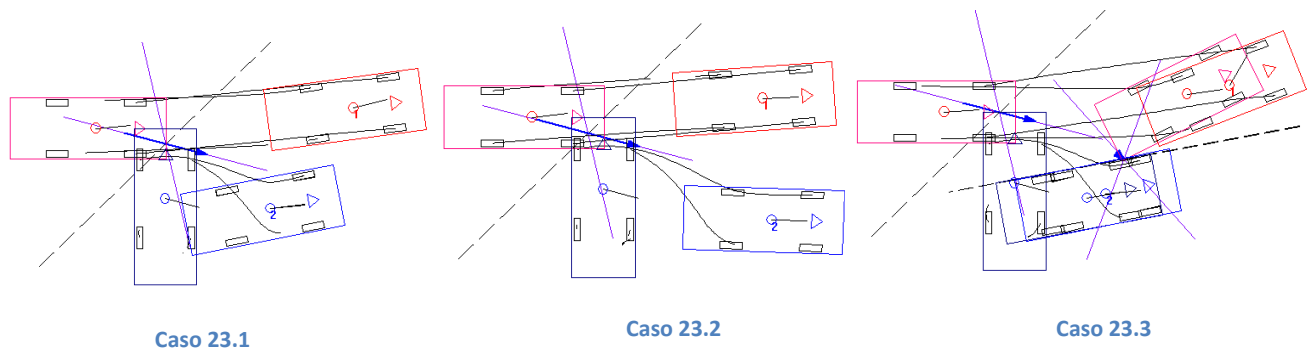
Deformación

	Peugeot 1	Peugeot 2
Caso 22.1	96 cm	1 cm
Caso 22.2	46 cm	48 cm
Caso 22.3	0 cm	89 cm

Al mover el punto hasta 1.72 (caso 22.1) se consigue que P2 no tenga prácticamente deformación mientras que P1 sea el que absorbe toda la energía del choque. En el caso 22.2 el punto de contacto esta en el centro de los dos vehículos produciéndose una deformación similar en ambos y para el caso 22.3 es P2 quien absorbe toda la energía mediante la deformación.

6.7.2 Variación en el eje Y

Variando la posición de punto de impacto en el eje Y conseguimos que el punto de aplicación del vector de fuerza llegue a estar en el extremo de la parte delantera de P2 para valores de y próximos a 0. O cerca de la esquina delantera derecha para valores próximos a $Y = -0.88$



1 PEUGEOT- :

	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 23.1 Y = -0.88	1.995	5.95	1.16	-50.03	12.30
Caso 23.2 Y = -0.44	2.055	7.01	0.52	3.87	4.66
Caso 23.3 Y = -0.01	1.515	8.62	0.74	21.25	5.29

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

En este caso a diferencia de la variación del punto en el eje X, el ángulo de rotación para P1 si que varía sustancialmente existiendo una diferencia de 71,28 grados entre el caso 23.1 y 23.3 sin embargo para el ángulo phi4 la diferencia es de 7.01 grados .

2 PEUGEOT- :

	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 23.1 Y = -0.88	1.995	7.06	-3.15	-4.37	-14.46
Caso 23.2 Y = -0.44	2.055	7.25	-2.85	-1.91	-10.36
Caso 23.3 Y = -0.01	1.515	5.16	-2.3	11.36	-6.68

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

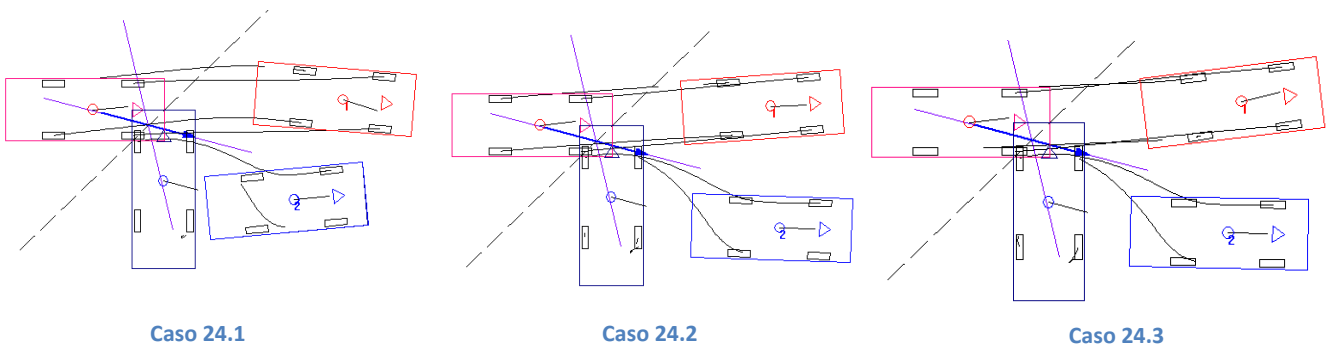
Observando la tabla anterior se puede afirmar las diferencias entre casos extremos son menores que para el vehículo 1. Siendo para phi3 15,73 grados y para phi4 7.78.

Deformación

	Peugeot 1	Peugeot 2
Caso 23.1	0 cm	49 cm
Caso 23.2	46 cm	48 cm
Caso 23.3	46 cm	4 cm

6.7.3- Variación en el eje Z

El centro de gravedad de ambos vehículos está situado a 0.5m del suelo, PC- Crash ubica el punto de impacto un poco por debajo del centro de gravedad a 0,45 m, pero ese valor se puede variar haciendo que esté por debajo o por encima



1 PEUGEOT- :

	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 24.1 Z = 0.20	1.8	7.62	0.27	-4.55	2.21
Caso 24.2 Z = 0.45	2.055	7.01	0.52	3.87	4.66
Caso 24.3 Z = 0.60	2.01	7.4	0.51	7.02	4.31

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

2 PEUGEOT- :

	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 24.1 Z = 0.20	1.8	6.24	-2.53	5.27	-8.28
Caso 24.2 Z = 0.45	2.055	7.25	-2.85	-1.91	-10.36
Caso 24.3 Z = 0.60	2.01	7.06	-2.76	-1.1	-9.67

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

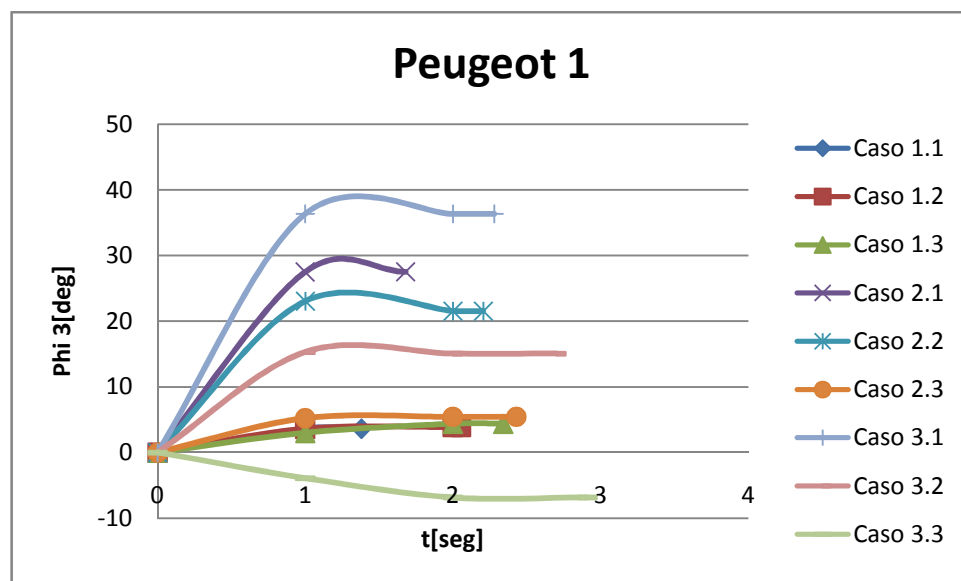
Como puede observarse para P1 la diferencia en el ángulo de salida es mínima mientras que el ángulo de rotación es un poco superior 11.57 grados mientras que para P2 la diferencia en el ángulo de salida también es muy poca mientras que para phi3 es de 6.37 grados. En este caso las no se produce variación en la deformación siendo para P1=46 cm y para P2 = 48 cm.

7- Presentación de resultados

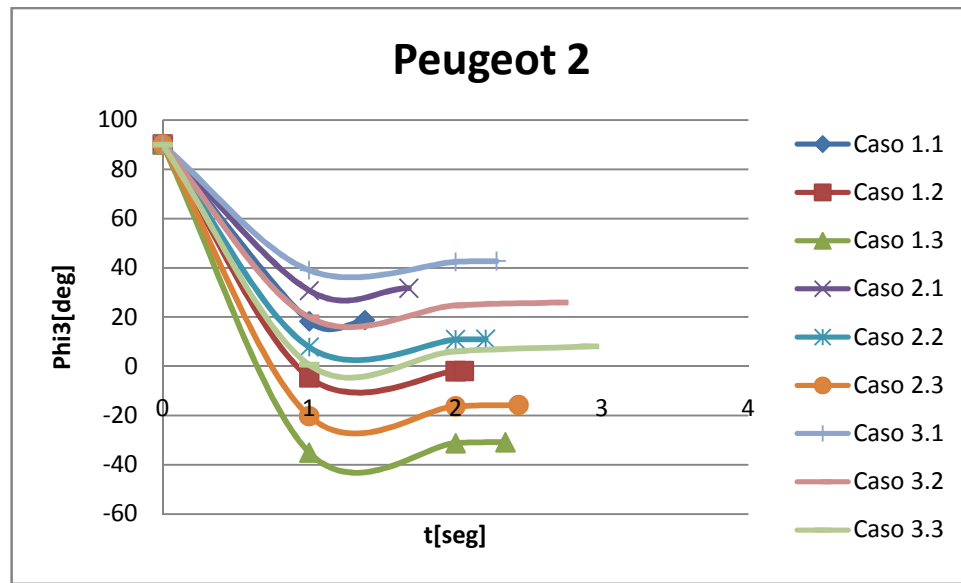
En el primer estudio realizado se han variado parámetros relacionados con la velocidad obteniendo los siguientes resultados:

Ángulo de rotación ϕ_3

Vehículo 1, no varía cuando la velocidad de P2 es 0 sin embargo aumenta conforme aumenta la velocidad de P2 y disminuye conforme aumenta su propia velocidad.

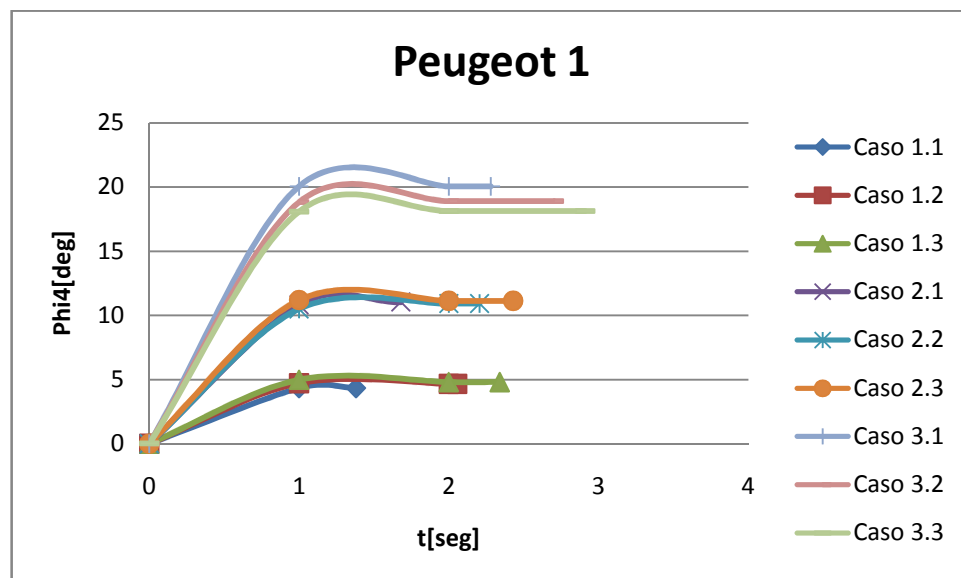


Vehículo 2, aumenta conforme aumenta su propia velocidad y disminuye conforme aumenta la velocidad de P1.

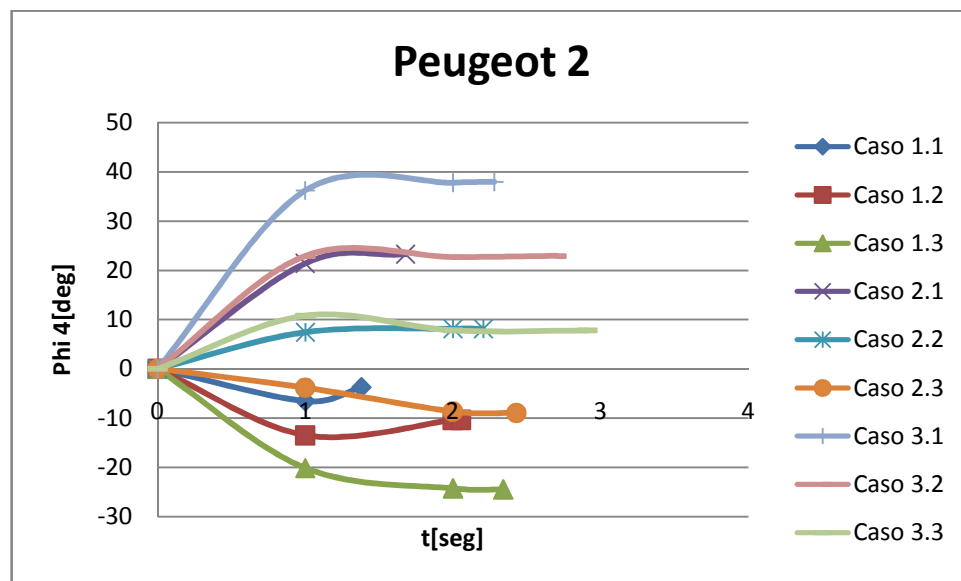


Ángulo de salida ϕ_4

Vehículo 1, aumenta conforme aumenta la velocidad de P2 y se mantiene prácticamente constante conforme aumenta su velocidad.

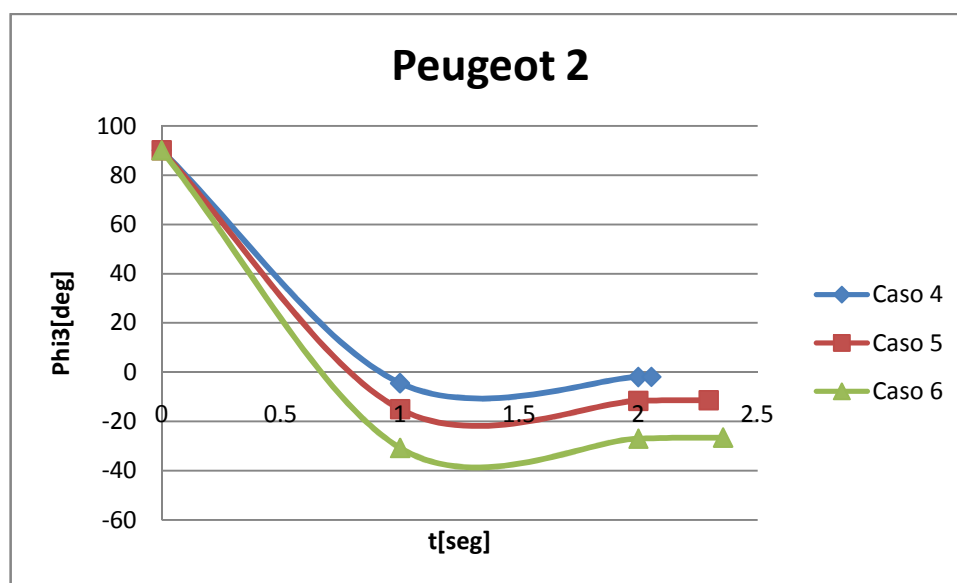
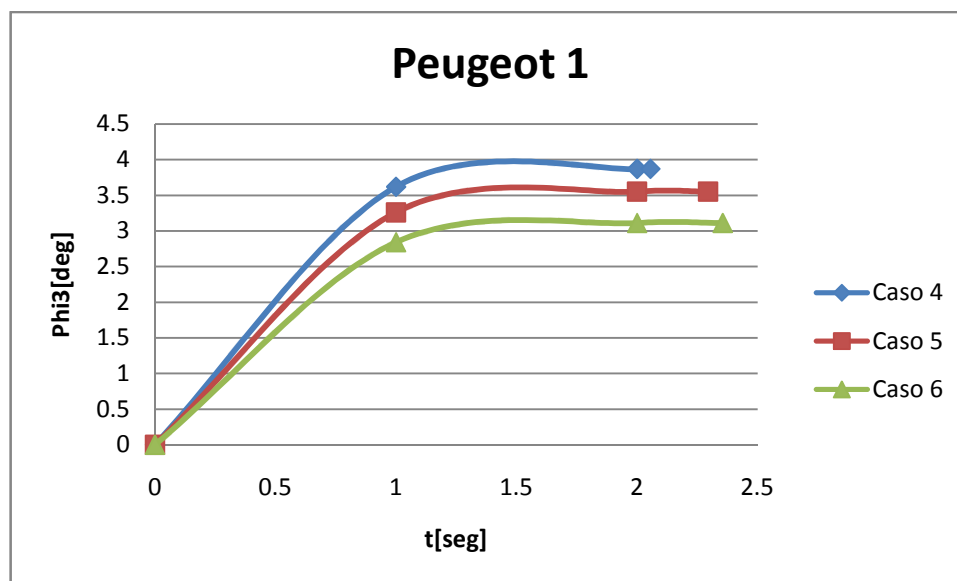


Vehículo 2, aumenta a medida que su velocidad es mayor y disminuye a medida que la velocidad de P1 es mayor.

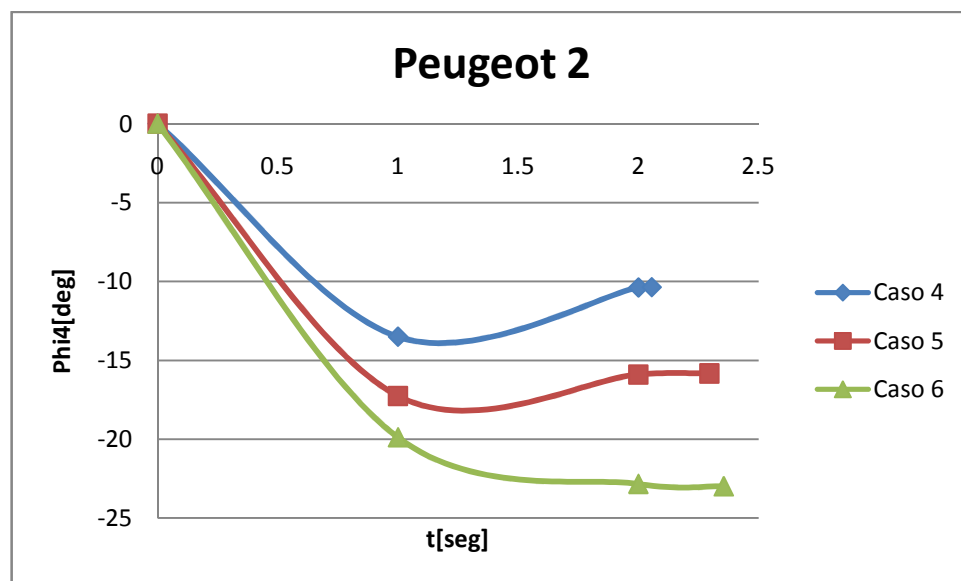
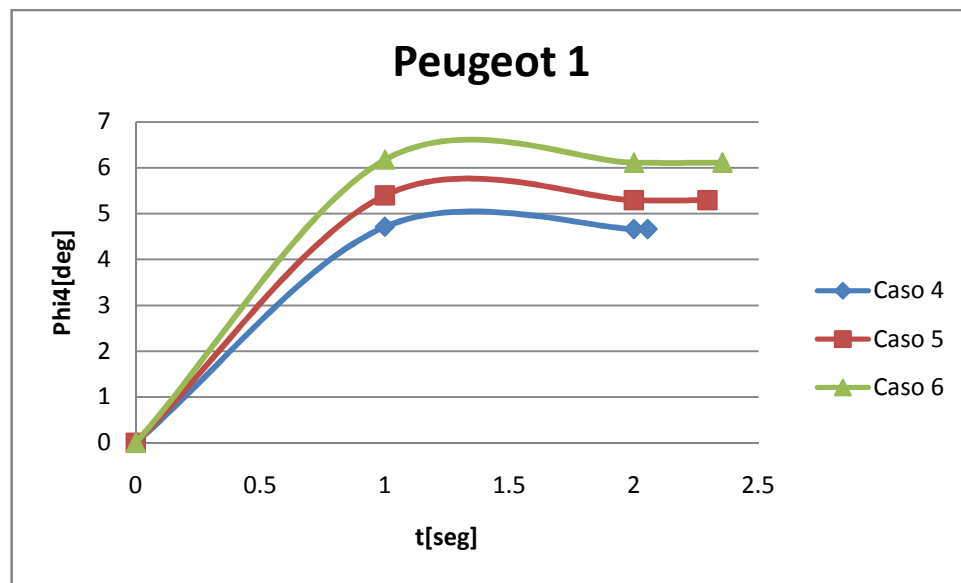


El segundo de los casos estudiados corresponde a la variación del coeficiente de restitución desde un valor de 0.1 hasta 0.3 y los resultados obtenidos han sido los siguientes:

Ángulo de rotación ϕ_3 en el vehículo 1 no se produce prácticamente variación mientras que para P2 la diferencia entre el caso 4 ($\epsilon = 0.1$) y el caso 6 ($\epsilon = 0.3$) es de 24,65 grados.



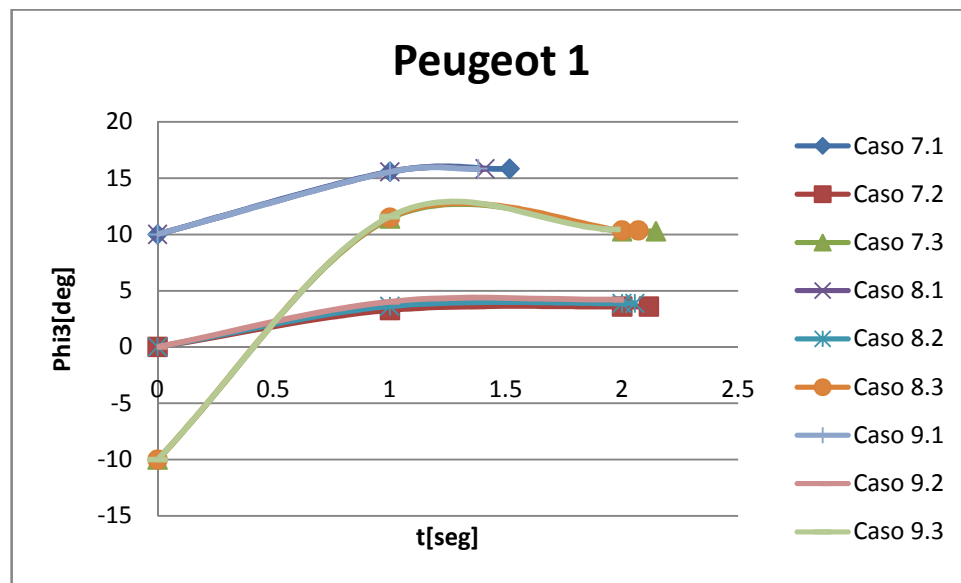
Ángulo de salida ϕ_{i4} para P1 aumenta ligeramente al aumentar el coeficiente mientras que para P2 produce el efecto contrario, una diferencia de 12,64 grados.



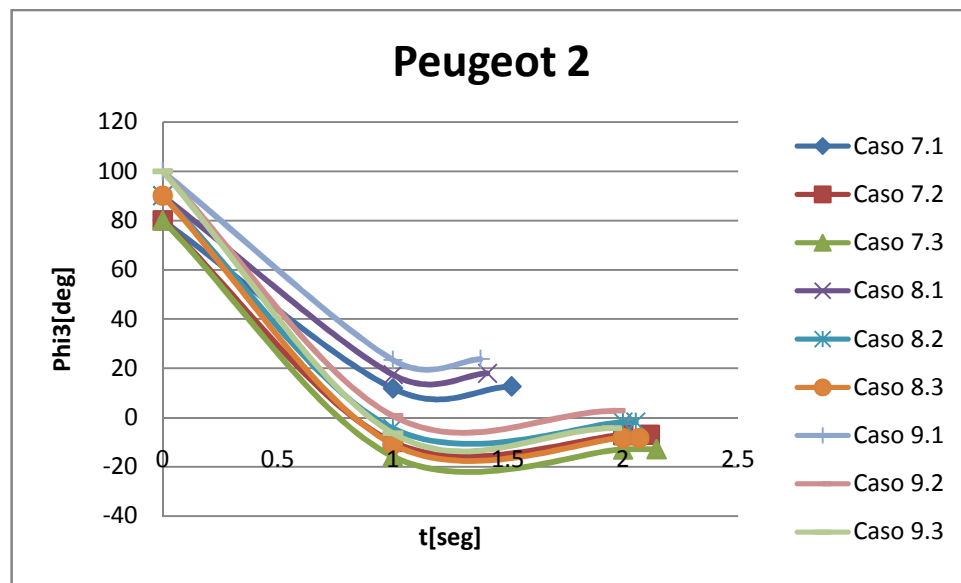
En el tercero de los casos la variación en los parámetros se producían en el ángulo de choque, variando el ángulo de ataque desde -10 hasta 10 grados y el ángulo del vehículo impactado de 80 a 100 grados haciendo todas las combinaciones posibles entre estos rangos.

Ángulo de rotación ϕ_3

Vehículo 1, no es sensible a la variación del ángulo del vehículo impactado y no sigue una relación conforme disminuye su ángulo de ataque. Valores entorno a 15 grados cuando el ángulo es 10, entorno a 4 cuando es 0 y entorno a 10 cuando es -10.

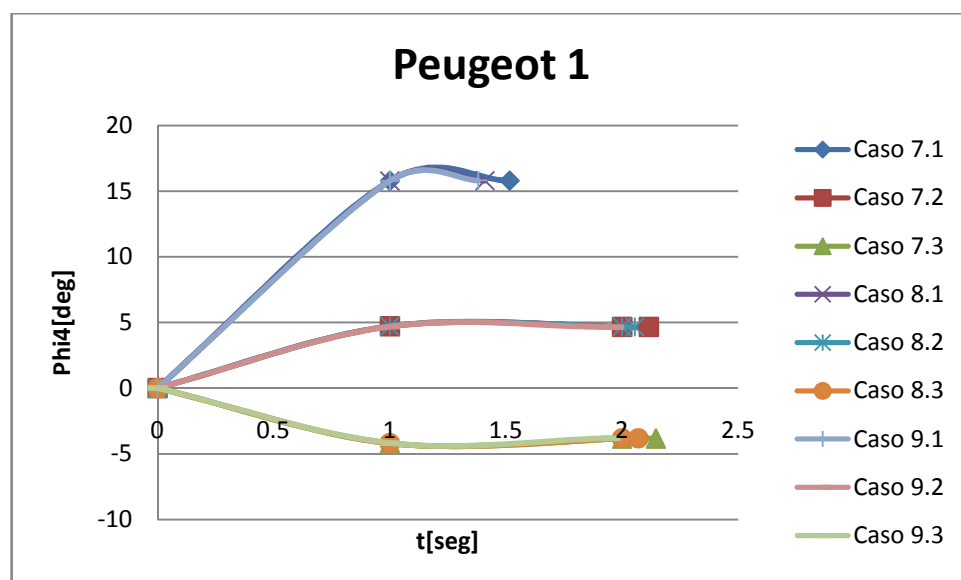


Vehículo 2, aumenta conforme aumenta el ángulo de su posición inicial y disminuye considerablemente a medida que el ángulo de ataque del vehículo 1 es menor.

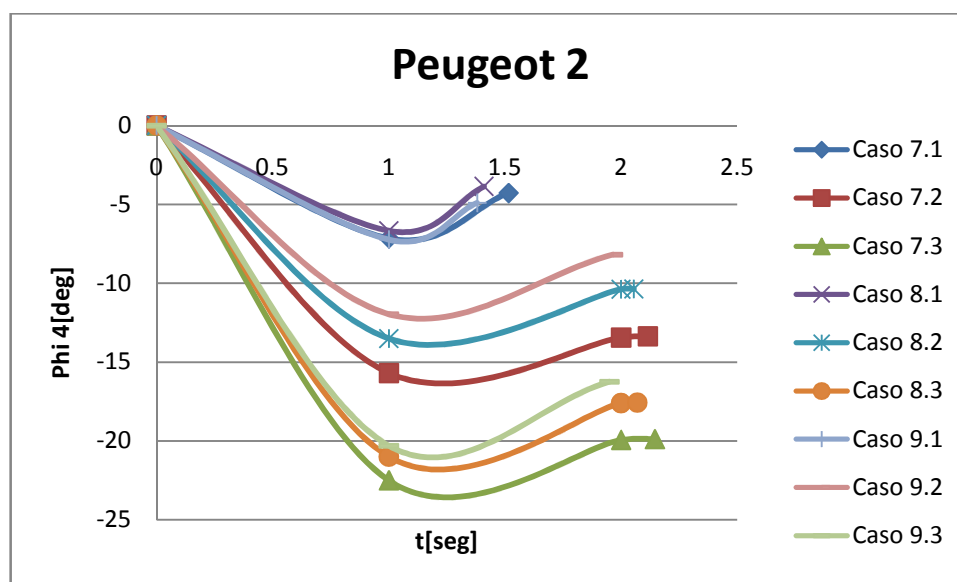


Ángulo de salida phi4

Vehículo 1, igual que en el de rotación, no se producen variaciones al variar la posición de P2 sin embargo disminuye hasta un valor de 19 grados conforme disminuye su propio ángulo de ataque.



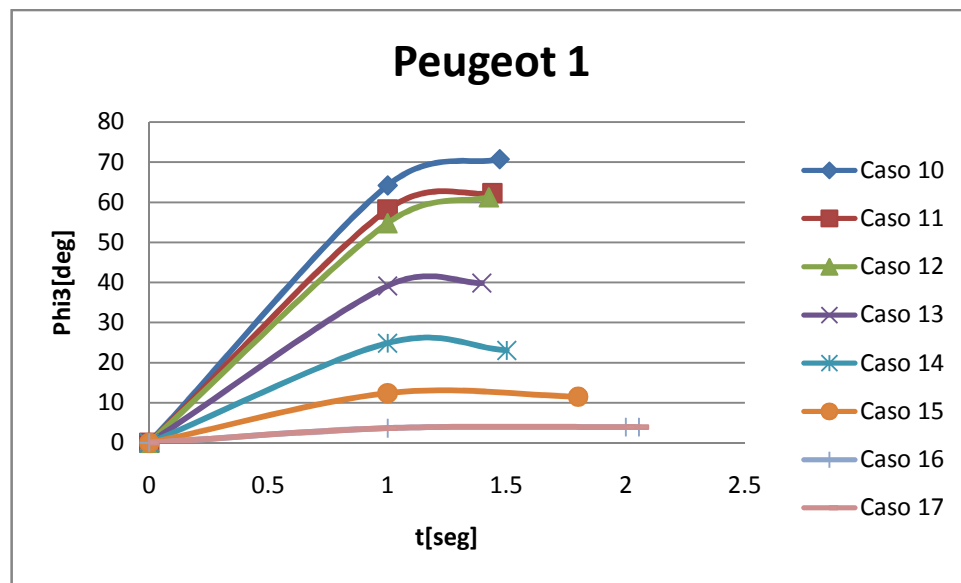
Vehículo 2, aumenta sensiblemente a medida que aumenta su propio ángulo inicial y disminuye hasta un valor máximo 15,62 producido en el caso 7 conforme disminuye el ángulo de ataque de P1.



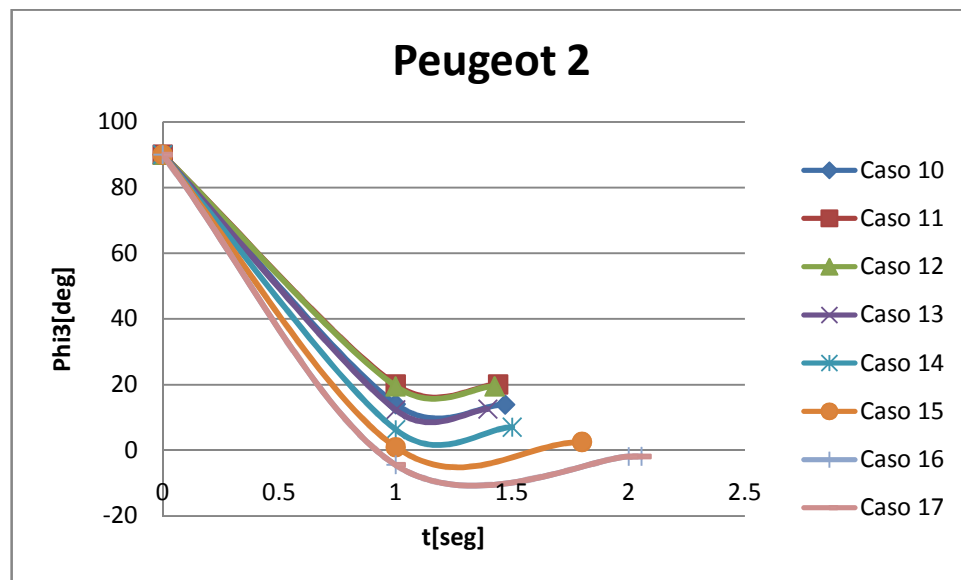
En el siguiente estudio la variación de parámetros se produce en el coeficiente de fricción de las superficies de contacto entre ambos vehículos desde $\mu=0$ hasta $\mu=0.7$ teniendo en cuenta que a partir de $\mu=0.6$ no se producen variaciones en las posiciones finales se obtienen los siguientes resultados:

Ángulo de rotación ϕ_3

Vehículo 1, cuando el coeficiente es igual a 0 el ángulo es de 70,7 grados mientras que cuando es igual a 0,6 es de 3,87 por lo tanto una diferencia de 66,8 grados.

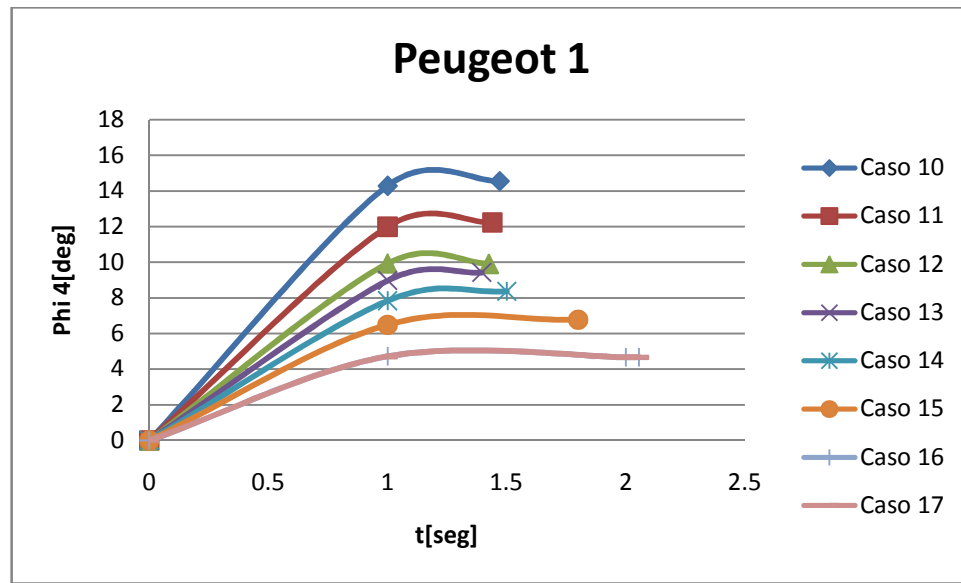


Vehículo 2, en este caso también disminuye el ángulo conforme aumenta el coeficiente de fricción aunque en menor medida que P1 se produce una pequeña excepción en el caso 10 que puede ser debida a que hay más de un choque.

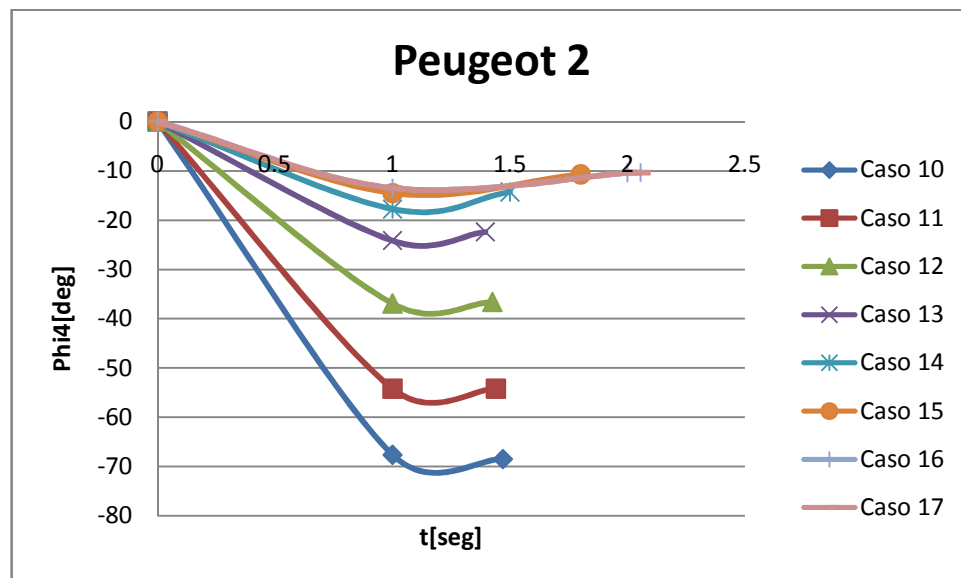


Ángulo de salida phi4

Vehículo 1, disminuye conforme aumenta el coeficiente de fricción hasta un valor máximo de 9,89 grados.



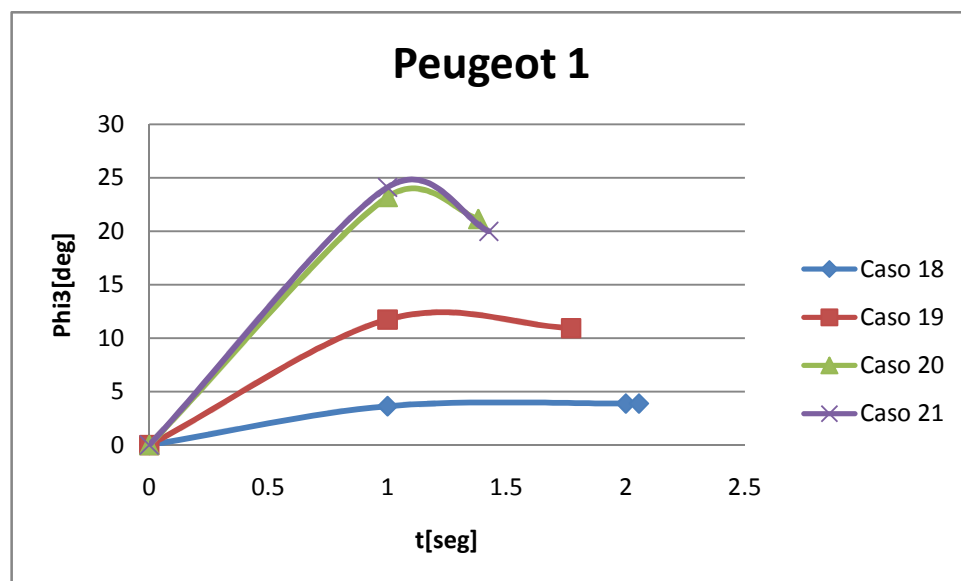
Vehículo 2, partiendo desde el caso en que $\mu=0$ y el ángulo es de -68,51 grados este aumenta hasta un valor de -10,36.



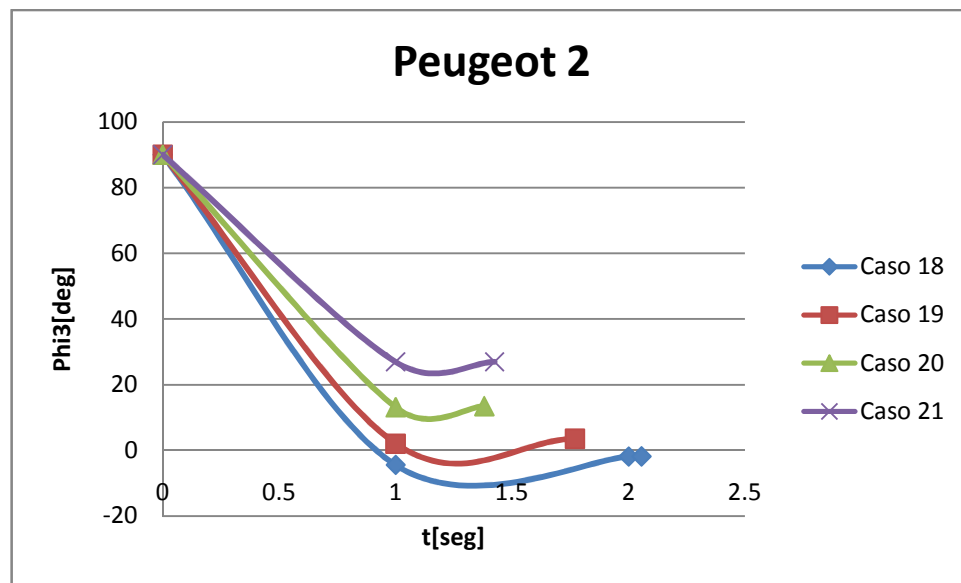
Como se dijo anteriormente el plano de contacto es la superficie de contacto entre los dos vehículos a través de la cual deslizan uno sobre otro. En los casos estudiados se parte de 44.19 grados que es el que el programa nos da por defecto hasta 30 grados. Por encima de los 44.19 no se producen variaciones en los resultados ya que el vector de fuerza está dentro del cono de fricción. Los resultados obtenidos realizando variaciones en el plano de contacto son:

Ángulo de rotación

Vehículo 1, aumenta al disminuir el plano de contacto desde un valor de 3.87 grados del caso 18 hasta 19.98 des caso 21 donde el ángulo es 30.

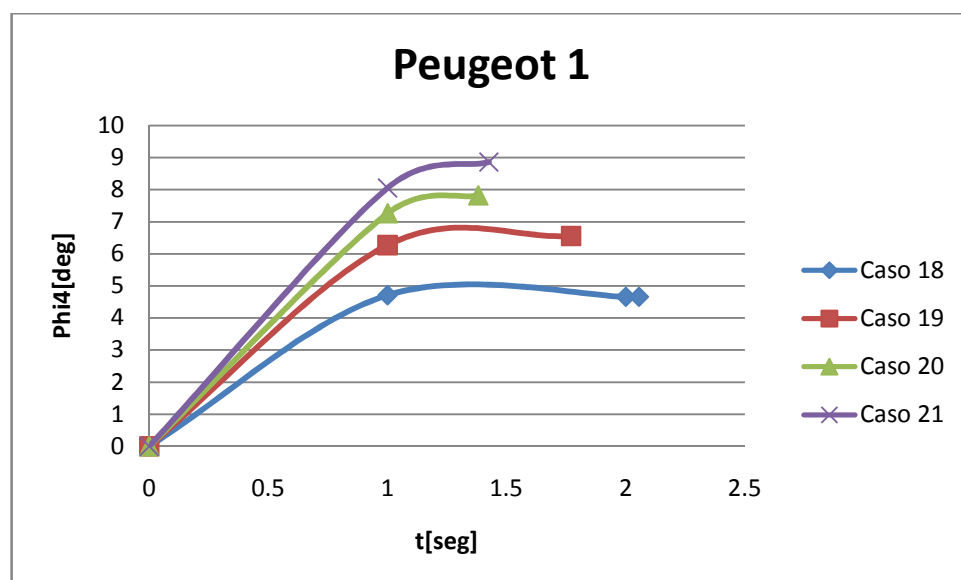


Vehículo 2, aumenta en mayor medida que el vehículo 1, en este caso se produce una variación de 28.97 grados

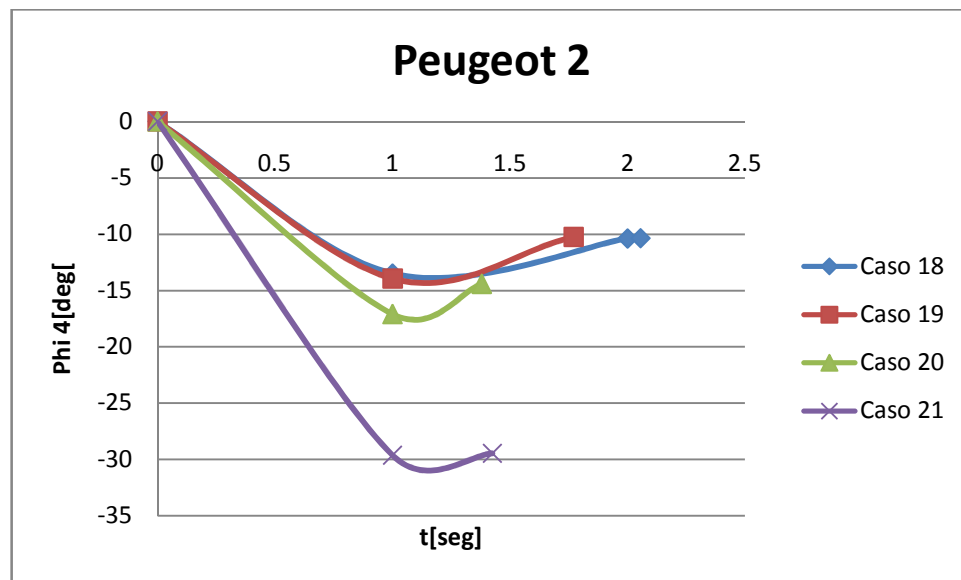


Ángulo de salida

Vehículo 1, en este caso la diferencia no es muy significativa 4.2 grados entre valores extremos. Aumentando conforme disminuye en ángulo del plano de contacto.



Vehículo 2, al igual que el vehículo 1 también aumenta según aumenta el ángulo del plano de contacto pero en este caso en mayor medida 19,12 grados, siempre en valores negativos.

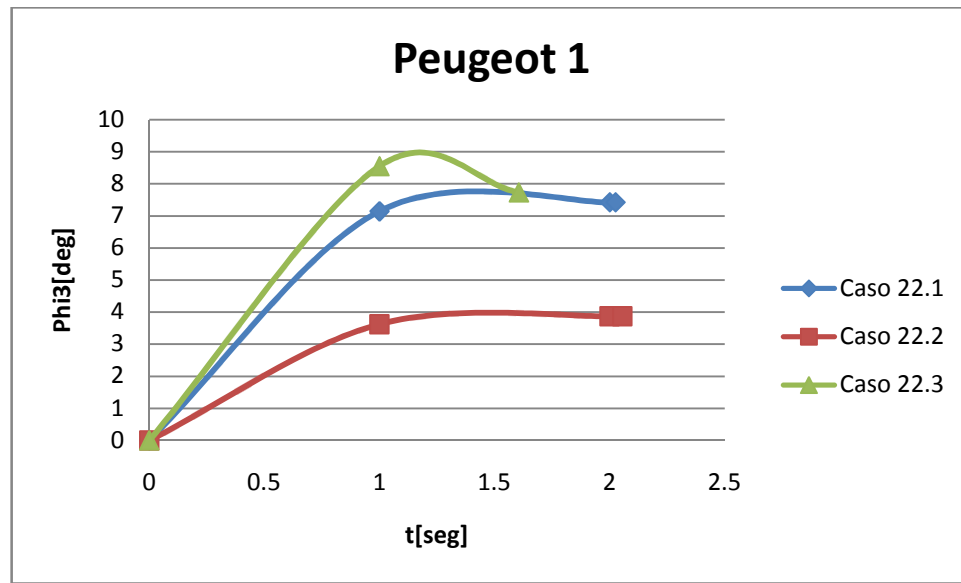


Por último las variaciones en el punto de contacto tanto en el eje X,Y o Z producen las siguientes reacciones en los vehículos implicados en el choque.

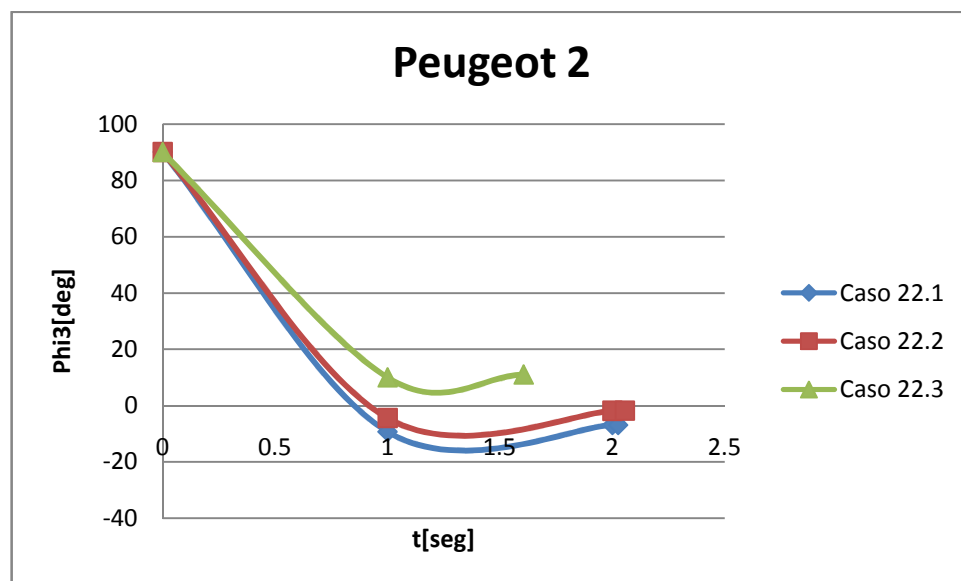
Eje X, el caso 22.2 en el que el punto de contacto se encuentra en el punto 2.17 es el que el programa nos da por defecto y se encuentra en el centro de la superficie de deformación de ambos vehículos. Se realiza el estudio en dos puntos clave mas, uno cuando $x=1.72$ donde prácticamente toda la deformación la recibe el vehículo 1 y otra cuando $X = 2.61$ donde toda la deformación la recibe el vehículo 2.

Ángulo de rotación

Vehículo 1, en este caso los valores extremos tienen resultados similares alrededor de 7 grados mientras que para el caso 22.2 es de 3.87 grados.

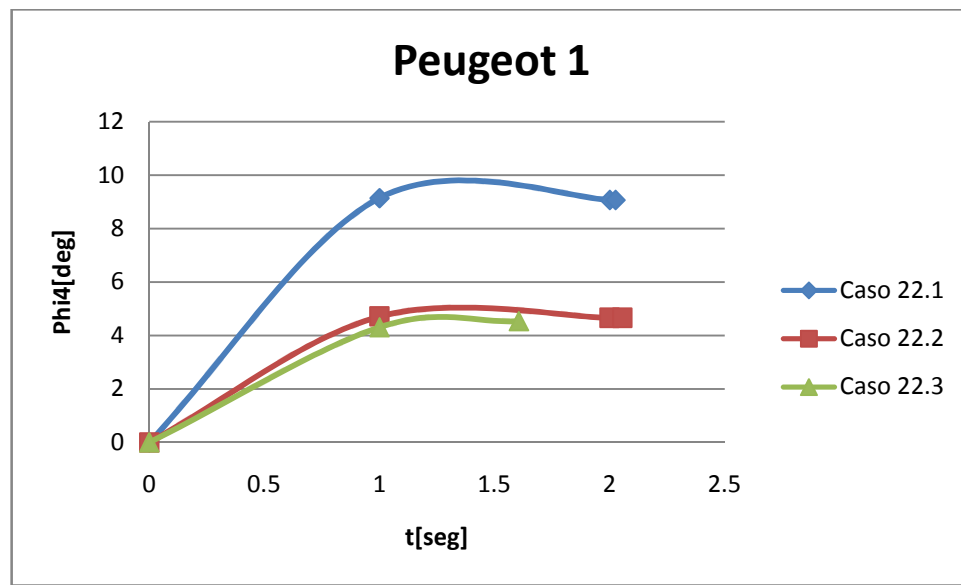


Vehículo 2, aumenta el ángulo a medida que el punto de contacto se desplaza a lo largo del eje X hasta un valor máximo de 17.91 grados.

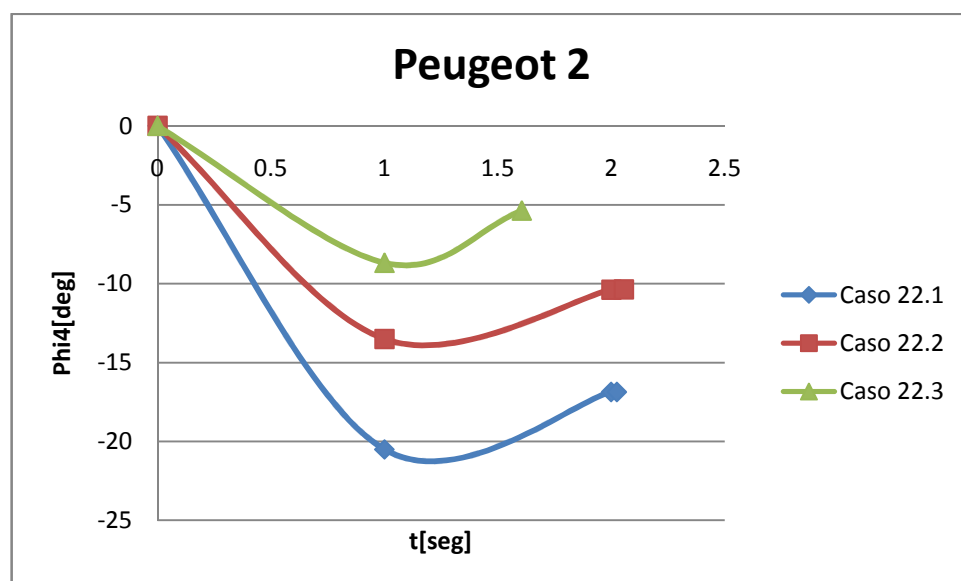


Ángulo de salida

Vehículo 1, no se producen grandes variaciones la diferencia máxima entre casos es de 4.53 grados.



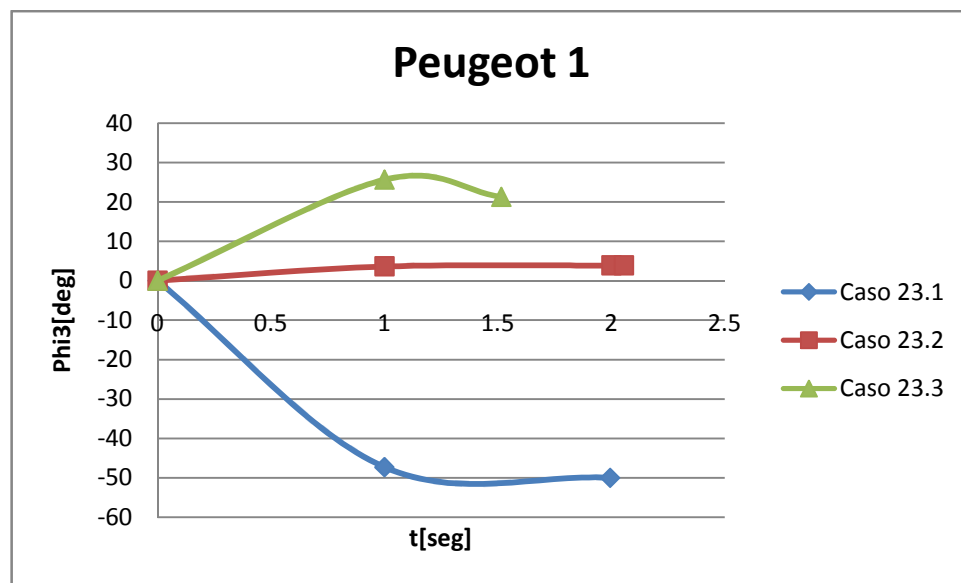
Vehículo 2, en este caso el ángulo aumenta conforme el punto de contacto se desplaza hacia el vehículo 2 un valor máximo de 11.51 grados.



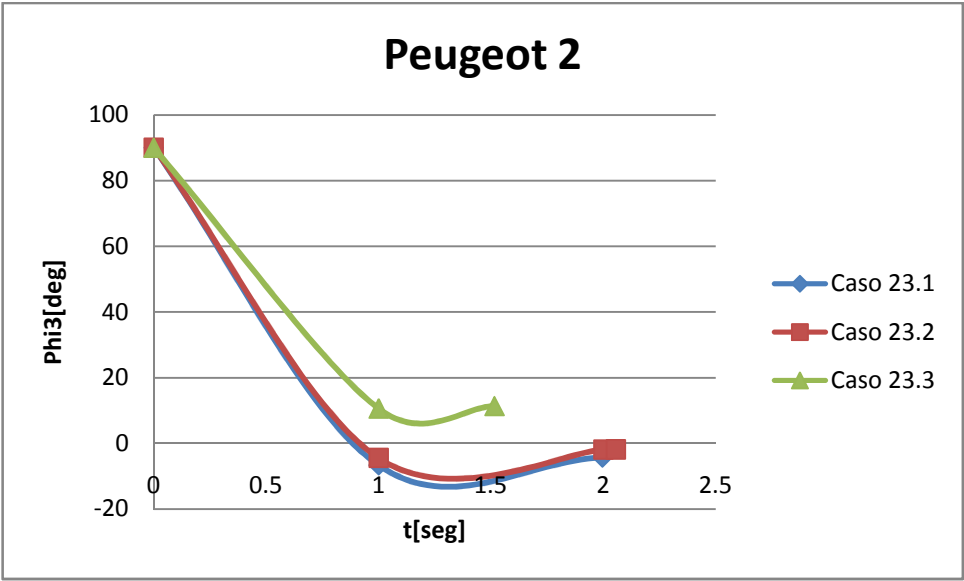
Eje Y, la variación del punto de contacto se produce a lo largo del eje Y, manteniendo constante tanto en el eje X (2.17^0) como el Z ($0,45^0$).

Ángulo de rotación

Vehículo 1, se produce una gran variación en la rotación del vehículo ya que el punto de aplicación del vector de fuerza hace que produzca un mayor momento. Para el caso en el que el punto en el eje Y es igual a $-0,88$ grados el ángulo de rotación es de $-50,03$ y para el caso 23.3 donde $Y=0,01$ el valor es de $21,25$.

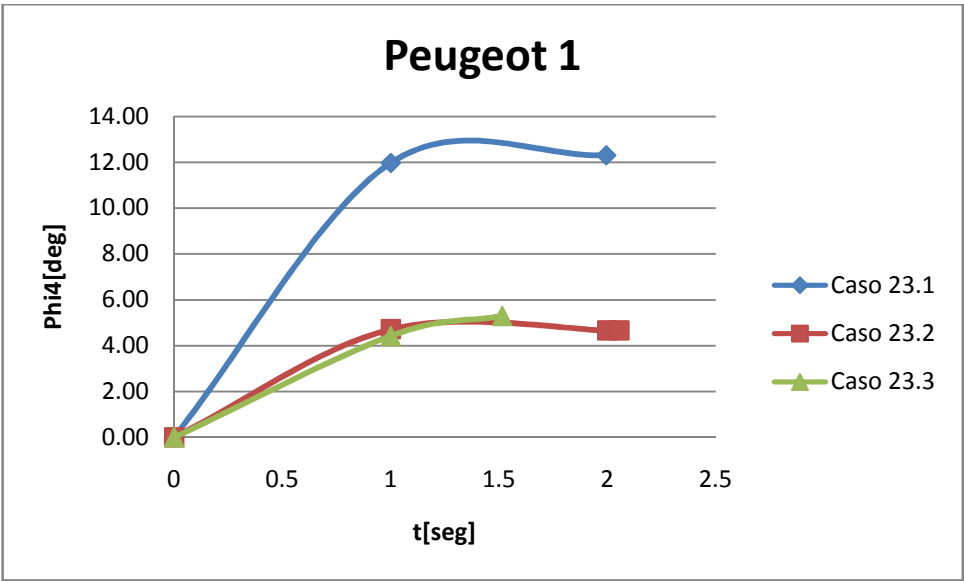


Vehículo 2, en este caso también se producen diferencias significativas aunque en menor medida que el vehículo 1, la diferencia máxima es de $15,73$ grados, aumentando el ángulo conforme el punto de contacto toma valores más próximos a 0 a lo largo del eje Y.

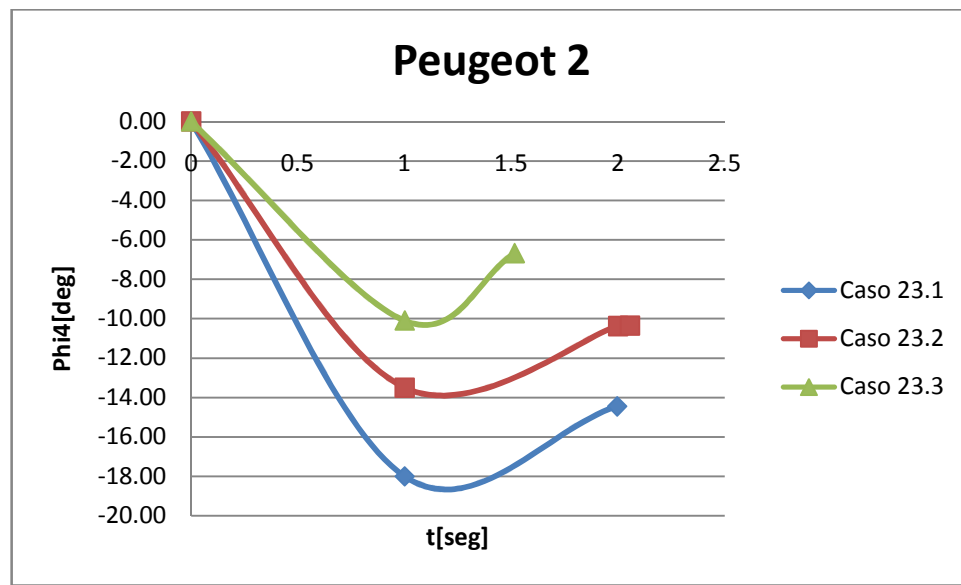


Ángulo de salida

Vehículo 1, el valor cuando $Y=-0,88$ es de 12,30 grados mientras que cuando $Y=-0,01$ es de 5,29.



Vehículo 2, igual que para el vehículo 1 las diferencias no son muy grandes 7.78 grados aumentando conforme el punto en el eje Y se acerca a 0.



Eje Z, La variación en el eje Z se produce variando la altura del punto de contacto, en el estudio realizado se estudian los casos por debajo y por encima del centro de gravedad, pero no se consiguen diferencias sustanciales en los resultados, quizá en otro tipo de colisión por ejemplo en una que se produjese el vuelco del vehículo sí que se conseguirían resultados mas significativos.

8- Ejemplos, combinación de resultados

Con los resultados obtenidos se realizará ahora una combinación de ellos para obtener valores extremos, es decir una mayor rotación o un mayor ángulo de salida para ambos vehículos.

8.1- Mayor rotación posible, Peugeot 1

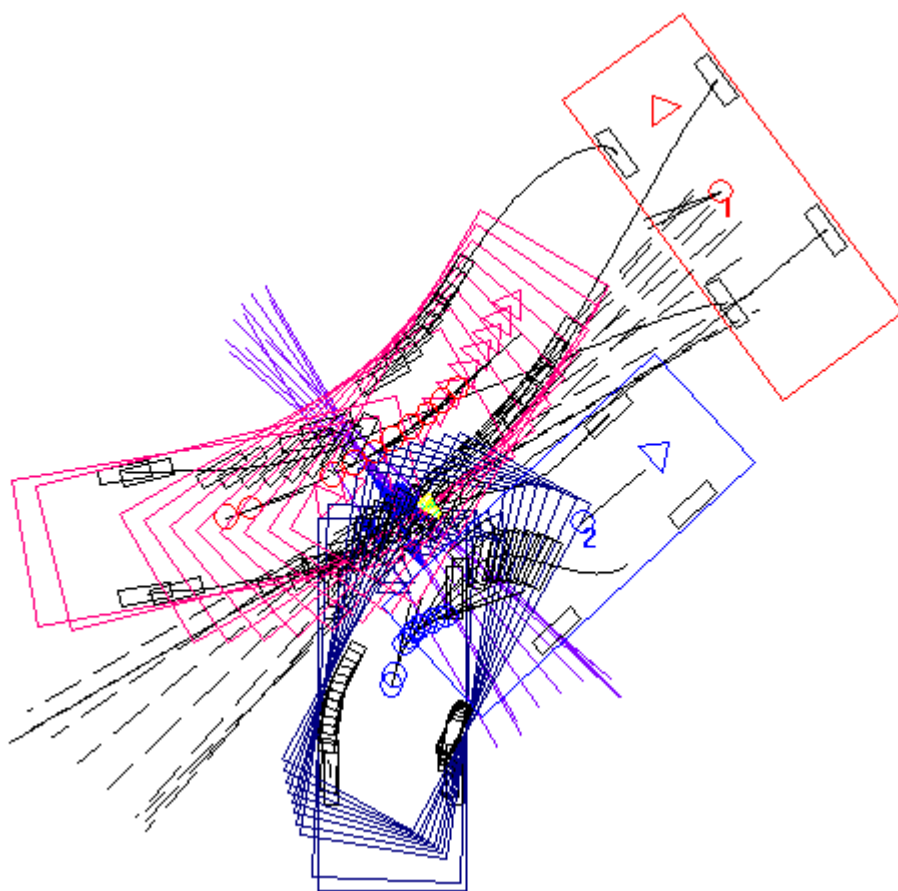
- $V1 = 40 \text{ Km/h}$
- $V2 = 20 \text{ Km/h.}$
- $\varepsilon = 0,1.$
- $\Phi_3^0 = 10.$
- Coeficiente de fricción igual a 0.
- Plano de contacto $\Phi = 30.$
- Punto de contacto $X = 2,65, Y = -0,02, Z = 60.$

El coeficiente de restitución en el vehículo 1 no producía variación por lo tanto dejamos el valor por defecto $\varepsilon = 0,1.$

El ángulo inicial del choque tan solo depende de su propio ángulo de ataque por lo tanto $\Phi_3^0 = 10.$

El Punto de contacto en el eje X en el estudio se observaba como los valores extremos daban valores similares en el ángulo de rotación, en este caso la diferencia es mucho mayor, aumentando el ángulo de rotación cuando el valor del punto de contacto en el eje X está más cerca del vehículo impactado.

Igual ocurre con la variación del punto de contacto en el eje Z, en los estudios realizados prácticamente no producía variaciones en el ángulo de rotación de P1, pero en este caso observamos como se produce un aumento conforme aumentamos la altura del punto de contacto.



1 PEUGEOT- :

	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 25	1.77	6.52	3.87	126.33	33.31

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida

Se observa como, con la combinación de parámetros de colisión se puede obtener un valor máximo de rotación del P1 de 126.33 grados.

8.2- Mayor rotación posible, Peugeot 2.

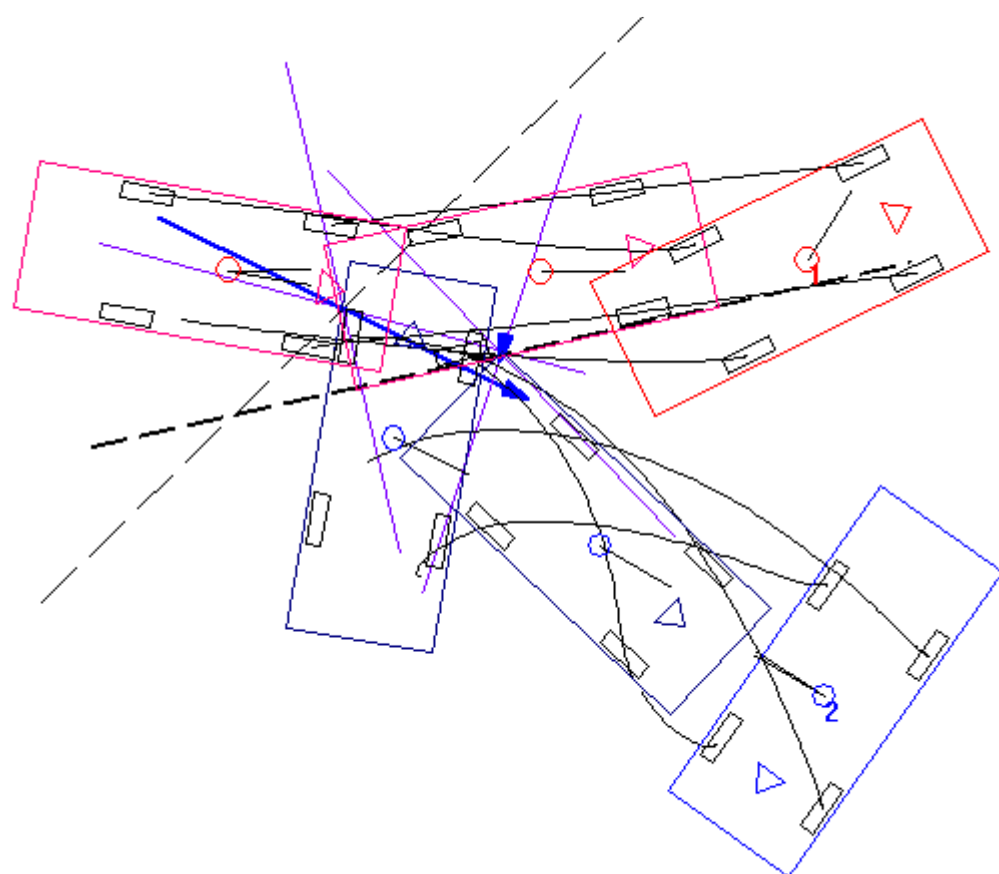
En este caso mayor ángulo de rotación en sentido horario, es decir valores negativos.

- $V1 = 60 \text{ Km/h.}$
- $V2 = 0 \text{ Km/h.}$
- $\varepsilon = 0,3.$
- Ángulo inicial del choque $P1 = -10^0$, $P2 = 80^0$.
- $\mu = 0,6.$
- Plano de contacto $\Phi = 44.19.$
- Punto de contacto $X = 1.99$, $Y = -0,44$, $Z = 0,45.$

2 PEUGEOT- :

	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 26	1.815	7.72	-5.06	-124.92	-30.86

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida



8.3- Mayor ángulo de salida, Peugeot 1

- $V1 = 40 \text{ Km/h}$
- $V2 = 20 \text{ Km/h}$
- $\varepsilon = 0,3$
- Ángulo inicial del choque $P1 = 10^\circ$, $P2 = 90^\circ$
- $\mu = 0$
- Plano de contacto $\Phi = 30$
- Punto de contacto $X = 1.72$, $Y = -0.44$, $Z = 0.45$.

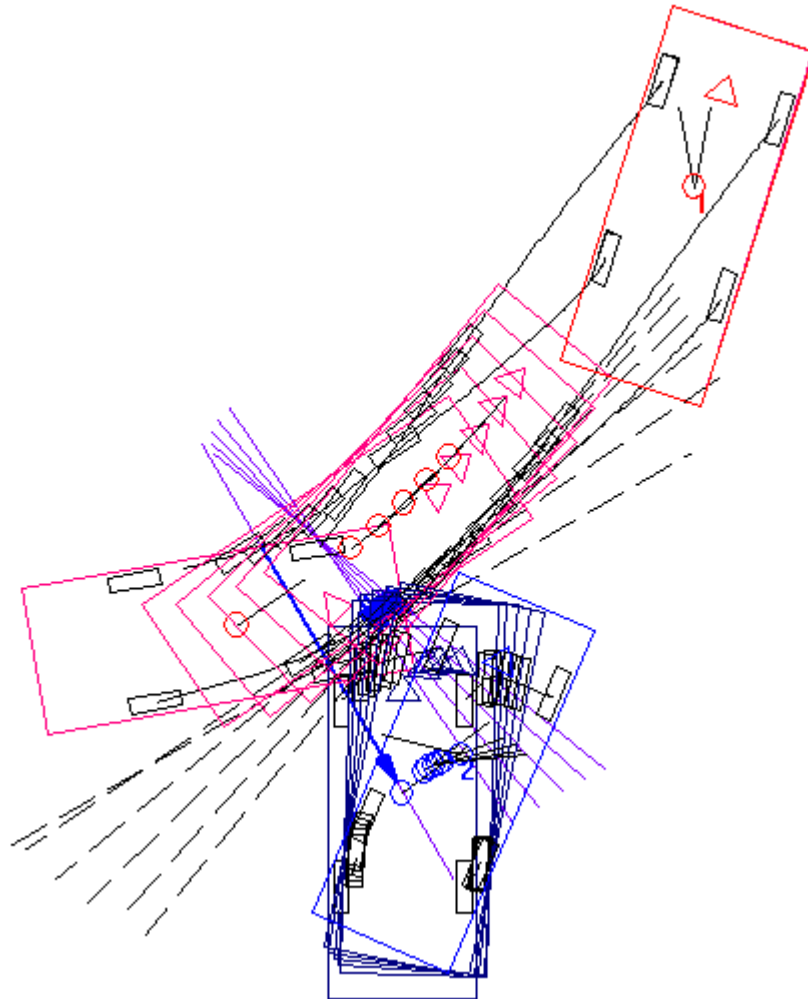
Al igual que en el ángulo de rotación el ángulo de salida tan solo depende de su propio ángulo de ataque.

Aunque las diferencias son mínimas variando el punto de contacto en el eje Y obtenemos la mayor diferencia en el centro.

1 PEUGEOT- :

	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 27	1.395	6.08	5.21	72.21	43.71

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida



8.4- Mayor ángulo de salida, Peugeot 2

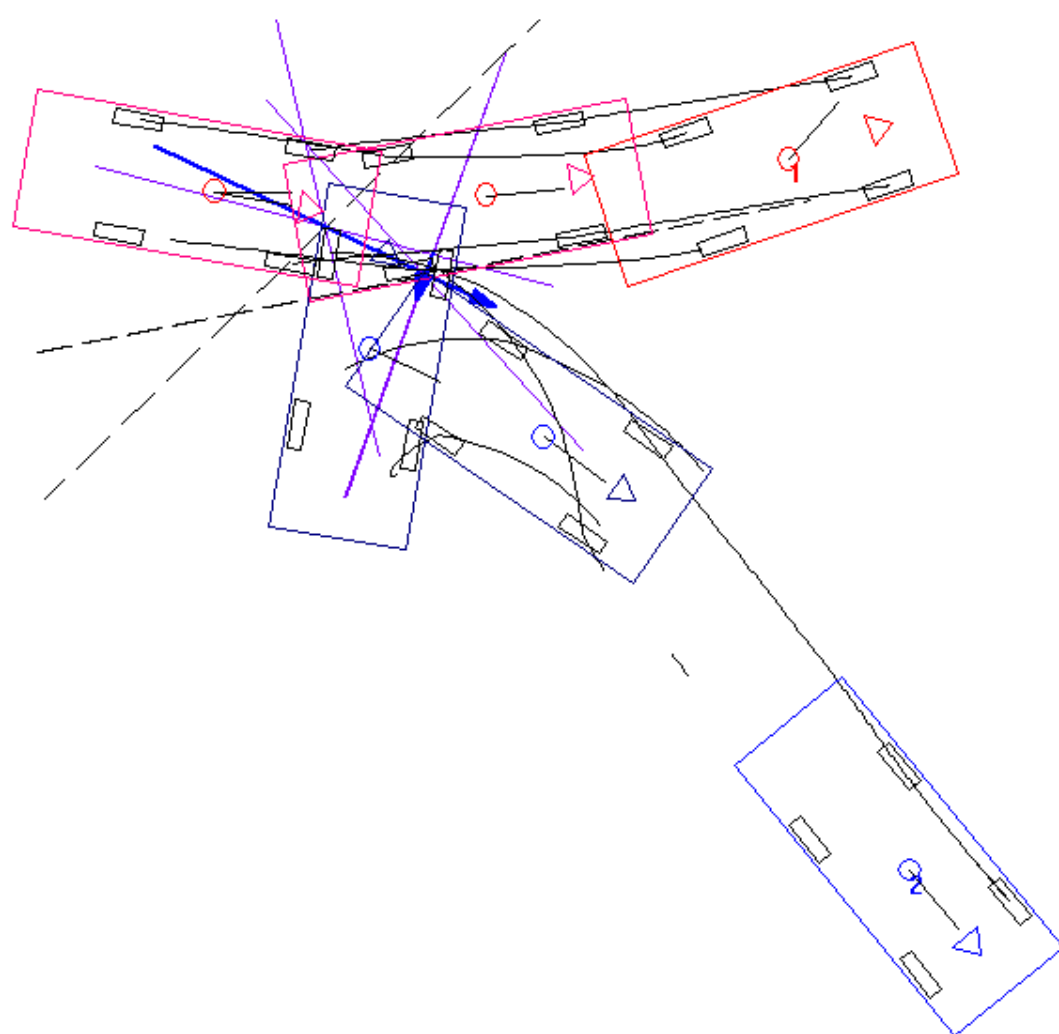
- $V1 = 60 \text{ Km/h.}$
- $V2 = 0 \text{ Km/h.}$
- $\epsilon = 0,3.$
- Ángulo inicial del choque $P1 = -10^0$, $P2 = 80^0$.
- $\mu = 0,6.$
- $\Phi = 44,19$ grados.
- Punto de contacto $X = 2.03$, $Y = -0.44$, $Z = 0,45$.

Aunque en el estudio se producía un mayor ángulo de salida para el plano de contacto igual a 30 grados en este caso se produce una mayor variación cuando el ángulo es 44,19 grados.

2 PEUGEOT- :

	t[s]	x [m]	y [m]	phi3[deg]	Phi4[deg]
Caso 28	2.88	9.44	-8.61	-50.78	-44.02

phi3: Ángulo del vehículo; phi4: Ángulo de salida



9- Conclusiones.

Las mayores variaciones en el resultado final para este caso en concreto se obtienen variando la velocidad y el coeficiente de fricción entre ambos vehículos. Esto no quiere decir que se pueda aplicar a todos los casos por igual ya que según el tipo de colisión estos factores pueden influir en mayor o menor medida.

Se puede afirmar a la vista de los resultados obtenidos en el estudio, como un pequeño cambio en el punto de impacto o plano de contacto, valores difíciles de obtener en casos reales, hacen que la reacción del vehículo sea totalmente diferente. A la vista está, que una pequeña variación en alguno de los parámetros relacionados en una colisión pueden variar en gran medida las posiciones finales de los vehículos implicados, es por esto que la reconstrucción de accidentes es una tarea tan difícil, ya que son muchos los factores que influyen.

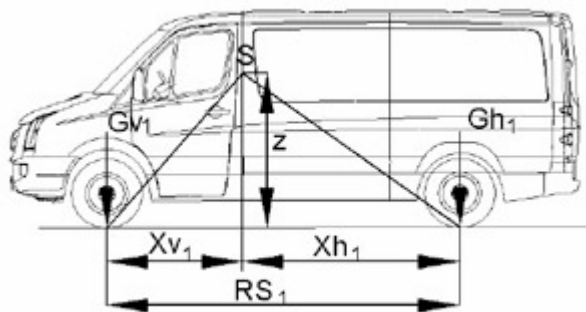
10- Referencias bibliográficas

- EVALUATION OF PC CRASH as tool for profesional traffic accident research and reconstruction. Report nr 2000.18. Author H.H Spit (380461).
- Accident reconstruction Guidelines Part of Deliverable D4.
- Verificación y comprobación de criterios normativos mediante la utilización de simuladores y modelos de reconstrucción de accidentes. Diego Santiago González, Francisco Javier Saura Lopez.
- Técnicas de reconstrucción de accidentes. I congreso de seguridad vial. Logroño, 22 al 25 de Noviembre de 2004. Autores: Francisco Javier Saura Lopez y Ramón Crespo del Río
- Modelo teórico para la reconstrucción de accidentes de tráfico por ordenador. Jose Antonio Lozano Ruiz. Tesis Doctoral 1996.
- PC-Crash a simulation program for vehicle accidents "Operating manual". Version 8.0 (novemver 2006). Dr Steffan Datentechnik, Linz, Austria
- PC-Crash a simulation program for vehicle accidents "technical manual". Version 6.2 (Octubre 2001). Dr Steffan Datentechnik, Linz, Austria
- PC-Crash a simulation program for vehicle accidents. "Example manual". Version 6.2. Dr Steffan Datentechnik, Linz, Austria
- Reconstruction of twenty staged collisions with PC-Crash optimizer. 2001-01-0507. William E. Cliff, Andras Moser
- <http://www.vwn-aufbaurichtlinien.de/es/modellos/crafter/3-estructuras-y-equipos/35-alturas-del-centro-de-gravedad/>

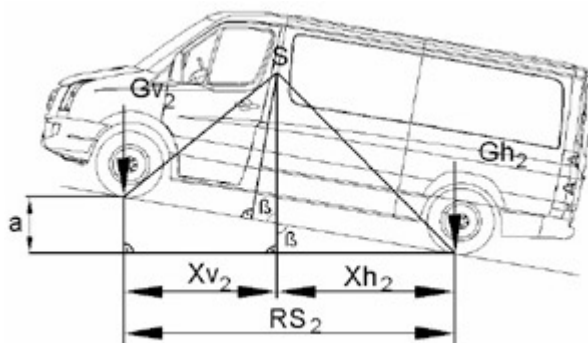
Anexo 1. Cálculo del centro de gravedad de un vehículo

Antes de realizar la medición se debe restablecer la presión de inflado de los neumáticos máxima y bloquear la suspensión del vehículo en los ejes delantero y trasero.

Al realizarlo se deben calcular las cargas sobre ejes medidas en plano horizontal (Gv_1 y Gh_1), así como las cargas sobre ejes con un eje elevado en la cifra a (recomendamos 500 mm) (Gv_2 y Gh_2). La distancia entre ejes RS_1 (3250 mm, 3665 mm o 4325 mm) viene definida por el modelo (véase pedido) o se debe calcular mediante la regla de longitud.



Medición 1



Medición 2

Medición con el eje elevado

X_{v1} , X_{v2} = distancia centro eje delantero medición 1 y 2

X_{h1} , X_{h2} = distancia centro eje trasero medición 1 y 2

v = eje delantero

h = eje trasero

Fórmula para cálculo del centro de gravedad

La suma de todos los momentos alrededor de un punto es igual a cero.

De ello resulta:

$$M_h = 0$$

$$(G_{v1} + G_{h1}) * X_{h1} = G_{v1} * RS_1 \quad (1)$$

$$X_{h1} = (G_{v1} * RS_1) / (G_{v1} + G_{h1}) \quad (2)$$

La nueva distancia entre ejes RS_2 después de elevar un eje se calcula del siguiente modo:

$$RS_2 = (RS_1^2 - a^2)^{1/2} \quad (3)$$

De forma análoga al X_{h1} se calcula X_{h2} :

$$X_{h2} = (G_{v2} * RS_2) / (G_{v2} + G_{h2}) \quad (4)$$

La altura del centro de gravedad z se calcula:

$$Z = \tan \beta * y \quad (5)$$

El ángulo desconocido β se calcula en base a :

$$\cos \beta = a / RS_1 \quad (6)$$

de ello resulta para β

$$\beta = \cos^{-1} (a/RS_1) \quad (7)$$

La y necesaria se obtiene de la ecuación:

$$Y = Xh_1 - (u^2 + Xh_2^2)^{1/2} \quad (8)$$

Los valores para Xh_1 y Xh_2 se han calculado con las ecuaciones (2) y (4), la u necesaria se calcula con:

$$a / RS_2 = u / Xh_2 \quad (9)$$

y conduce a la siguiente ecuación

$$u = a * Xh_2 / RS_2$$

El centro de gravedad es un punto imaginario desde el cual se podría suspender un vehículo y mantendría equilibrio. El Vehículo ideal sería aquel donde el centro de gravedad (lateral y vertical) estuviera en el centro, esto agregado con una buena suspensión nos daría un vehículo muy neutral y fácil de maniobrar a altas velocidades. Pero ya que el motor tiende a estar en la parte delantera del auto el centro de gravedad se ubica más adelante.

Cuanto más alto se encuentre el centro de gravedad, mayor transferencia de peso (carga vertical) ocurre. Algo que se puede hacer para mejorar la suspensión en términos de transferencia de peso es claro, reducir el peso. A menor peso, menor transferencia del mismo.

Anexo 2. Características de los vehículos implicados en el caso base.

Vehículo :	PEUGEOT-307 - 3 NFU
Longitud [m] :	4.42
Anchura [m] :	1.76
Altura [m] :	1.55
Número de ejes :	2
Batalla [m] :	2.21
Voladizo delantero [m] :	0.89
Anchura huella delantera [m] :	1.46
Anchura huella trasera[m] :	1.46
Masa (vacío) [kg] :	1399
Peso de ocupantes delanteros [kg] :	0
Peso de ocupantes traseros [kg] :	0
Peso de carga en maletero [kg] :	0
Peso de carga en techo [kg] :	0
Distancia del C. de G. al eje delantero [m] :	1.11
C. de G., altura sobre el suelo [m] :	0.5
Rotación momento de inercia [kgm ²] :	521.1
Balanceo momento de inercia [kgm ²] :	1736.9
Orientación momento de inercia [kgm ²] :	1736.9
Rigidez, eje 1, izquierdo [N/m] :	22873.65

derecho [N/m] :	22873.65
eje 2, izquierdo [N/m] :	22873.65
derecho [N/m] :	22873.65
Amortiguación, eje 1, izquierdo [Ns/m]:	2573.29
derecho [Ns/m]:	2573.29
eje 2, izquierdo [Ns/m]:	2573.29
derecho [Ns/m]:	2573.29
Max. áng. deslizamiento, eje 1, izquierdo [deg]:	10
derecho [deg]:	10
eje 2, izquierdo [deg]:	10
derecho [deg]:	10
ABS :	No

Anexo 3. Secuencias

	1 PEUGEOT- :	2 PEUGEOT- :
REACCIÓN		
Tiempo de reacción [sec] :	0.8	0.8
DEFICIENCIAS DE FRENADA		
Umbral de tiempo [sec] :	0.2	0.2
VALORES INICIALES		
Velocidad [km/h] :	50	0
Coeficiente de rozamiento :	0.8	0.8
FRENADA		
Máxima distancia de parada [m] :	100	100
Fuerza de frenada [%]		
Eje 1, izquierdo :	150.69	500
Eje 1, derecho :	150.69	0
Eje 2, izquierdo :	49.31	0
Eje 2, derecho :	49.31	0
Promedio de la aceleración de frenada [m/s^2] :	-7.74	-2.16
POSICIÓN		
Ángulo de orientación [deg] :	0	90
Centro de gravedad x [m] :	0.63	2.6
Centro de gravedad y [m] :	0	-2
Centro de gravedad z [m] :	0.5	0.5

